



Le bouquetin est une espèce emblématique des Alpes. L'enjeu de sa sauvegarde dans les années 1960 est d'ailleurs à l'origine de la création du Parc National de la Vanoise. Depuis, l'établissement est à l'avant-garde, aux côtés du Parc national italien du Grand Paradis, pour la connaissance et le suivi de cette espèce.

Sa réintroduction est l'un des exemples de conservation les plus remarquables en Europe. Néanmoins à l'heure actuelle les populations présentent un fort taux de consanguinité et donc un affaiblissement de la diversité génétique. Elles sont de fait plus vulnérables face aux maladies et autres menaces telles que le changement climatique (Brambilla et al., 2020).



I. Des ressources menacées par le changement climatique

Quelles
conséquences

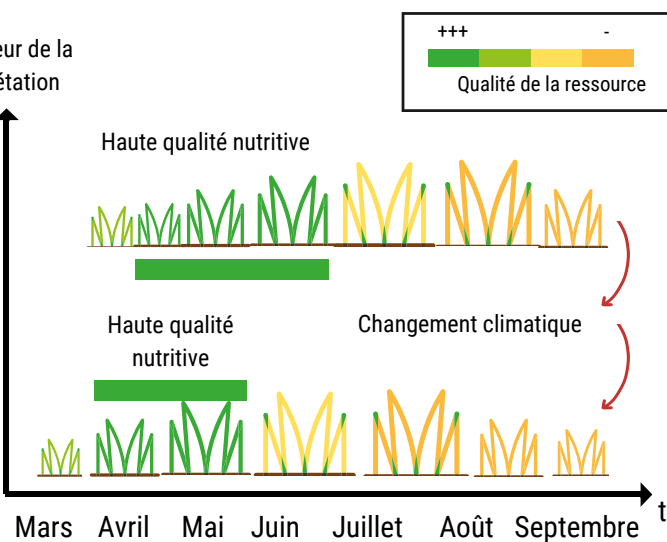
Évolution temporelle de la ressource alimentaire

Suite à l'augmentation des températures et à la fonte précoce de la neige, la croissance des plantes est plus rapide et démarre plus tôt. Ainsi dans le **massif de Belledone**, le pic de végétation (période où la qualité des ressources est maximale) a avancé de **2 semaines en 30 ans** (Toïgo et al., 2016).

Dans un premier temps, on pourrait penser que des températures plus douces et une fonte précoce de la neige favorisent la croissance de la végétation et donc que davantage de ressources sont disponibles pour les bouquetins en sortie d'hiver (Toïgo et al., 2016).

Cependant la **croissance de la végétation s'accompagne d'une baisse de la qualité nutritive**. Avec une arrivée plus précoce du printemps et une croissance plus rapide de la végétation, **le pic qualitatif de la ressource sera donc avancé** et la **période de bonne qualité nutritive sera plus courte**. Des températures trop élevées en été vont également impacter la quantité des ressources, notamment en cas de sécheresses marquées (Brivio et al., 2019 ; Mason et al., 2017 ; Toïgo et al., 2016).

Hauteur de la
végétation



Représentation de l'impact du changement climatique sur la
qualité et la disponibilité des ressources alimentaires

Des conséquences en cascade :

1 Survie des individus

Les printemps chauds, via leur **influence sur la qualité des ressources**, vont impacter la survie des femelles en limitant l'apport de ressources nécessaires à la survie hivernale. Les étés chauds vont plutôt impacter les mâles et les jeunes cabris en **limitant la quantité de ressources**. En effet, ces derniers ont besoin de grandes quantités de nourriture avant l'entrée en hiver (Toïgo et al., 2016).



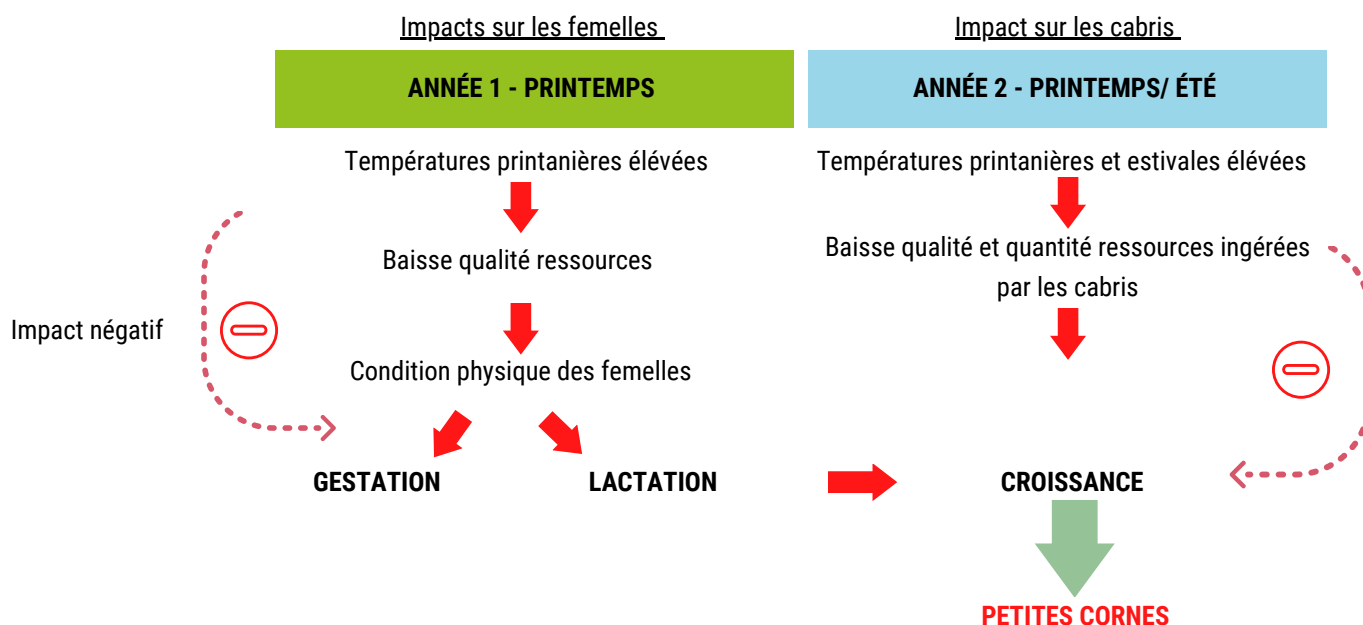
2 Nombre de cabris

La disponibilité et la qualité des ressources influencent également le nombre de cabris. Sous des températures élevées, les femelles n'accumulent pas assez d'énergie pour mener à bien la gestation et la lactation l'année suivante (cf. paragraphe "Stress thermique"). Le nombre de cabris apparaît **moins important** les années suivant des étés chauds (Toïgo et al., 2016).

3 Taille des cornes

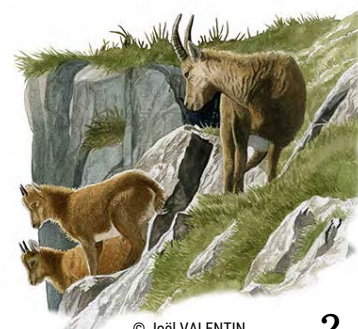
Il a été démontré que la croissance et la taille définitive des cornes d'un individu mâle **dépendent en partie des conditions environnementales présentes avant et après la naissance** (Mason et al., 2017 ; Toïgo et al., 2016). Comme expliqué précédemment, des printemps chauds limitent la qualité des ressources et affectent ainsi la condition physique des femelles en période de gestation puis en période de lactation (Toïgo et al., 2016). De même, sous de fortes chaleurs estivales les ressources disponibles pour l'alimentation des cabris lors de leur premier été seront moins abondantes et de moins bonne qualité.

➔ Les mâles nés les années où les températures printanières sont plus chaudes auront une croissance plus lente et des cornes plus petites tout au long de leur vie. Ils auront donc plus difficilement accès à la reproduction puisque les cornes constituent un caractère sexuel secondaire (Toïgo et al., 2016).



4 Décalage entre la période de mise bas et la disponibilité des ressources

Chez le bouquetin, la date de mise bas ne dépend pas des conditions printanières puisque l'accouplement se fait à l'automne. Une avancée trop importante du printemps pourrait donc **entraîner un décalage entre les ressources et les différentes étapes de la reproduction** (Cremonese et al., 2019).





II. Des impacts directs sur la physiologie

Quelles
conséquences

Stress thermique

Le bouquetin est une espèce adaptée aux températures extrêmes de l'hiver alpin, ce qui limite sa capacité à dissiper la chaleur. C'est donc une espèce **sensible à l'élévation des températures**. En réponse à l'augmentation des températures, les bouquetins **réduisent leur activité et se déplacent vers des zones plus fraîches**, plus en altitude ou situées sur des versants nord (Aublet et al., 2009 ; Brivio et al., 2019, Mason et al., 2017).

Le besoin de thermorégulation prend en effet le dessus sur l'acquisition de ressources. Les bouquetins peuvent en effet sélectionner des zones où la qualité ou la quantité de ressources sont moins importantes mais où les températures sont moins élevées (Aublet et al., 2009 ; Brivio et al., 2019, Mason et al., 2017).

Face à l'augmentation des températures, les différentes stratégies de thermorégulation (déplacements journaliers, réduction activité, etc.) entraînent également des **dépenses énergétiques importantes**, principalement avant l'entrée en hiver, **période la plus critique pour l'accumulation de réserves**. L'énergie ainsi dépensée pour la thermorégulation ne sera pas allouée à la reproduction ou à la survie pendant l'hiver (Aublet et al., 2009 ; Brivio et al., 2019, Mason et al., 2017).

SYNTHÈSE DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BOUQUETIN DES ALPES

Températures
printanières et
estivales plus chaudes

Arrivée du printemps plus précoce

Avancée de la période de végétation et
incidences sur la ressource

Un ensemble de conséquences directes ou indirectes

Désynchronisations entre les
ressources et les besoins
nutritifs

**mise bas dépend de
la période de rut (date
stable)*

Migrations journalières
vers des altitudes plus
élevées

Réduction des zones
d'alimentation des
bouquetins

Baisse taux de
survie

Baisse nombre de
cabris suite à des
printemps/ étés
chauds

Réduction taille
des cornes

Stress
thermique

Dépenses énergétiques
(déplacements +
thermorégulation)



En parallèle de ces effets directs et indirects, le dérangement des bouquetins induit par les activités humaines vient s'ajouter à ces pressions et peut engendrer des impacts physiologiques importants. C'est particulièrement le cas en hiver, période critique pour la survie où le stock d'énergie est limité. Tout dérangement peut entraîner des dépenses énergétiques importantes et donc limiter la survie des bouquetins.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Aublet, J.-F., Festa-Bianchet, M., Bergero, D. & Bassano, B. (2009). Temperature constraints on foraging behaviour of male Alpine ibex (*Capra ibex*) in summer. *Oecologia*, 159, 237–247.

Brivio, F., Zurmühl, M., Grignolio, S., von Hardenberg, J., Apollonio, M. & Ciuti, S. (2019). Forecasting the response to global warming in a heat-sensitive species. *Scientific Reports*, 9, 1–16.

Mason, T.H.E., Brivio, F., Stephens, P.A., Apollonio, M. & Grignolio, S. (2017). The behavioral trade-off between thermoregulation and foraging in a heat-sensitive species. *Behavioral Ecology*, 28, 908–918.

Toigo, C., Blanc, D., Couilloud, F. & Maillard, D. (2016). Réchauffement climatique et performance chez le bouquetin des Alpes : l'exemple de la population de Belledonne. *Faune sauvage*, 312, 3.



© BRÉGEON Sébastien - Parc national de la Vanoise



© GARNIER Alexandre - Parc national de la Vanoise



Comme pour le bouquetin des Alpes, les études sur le chamois suggèrent que le changement climatique a des influences directes et indirectes sur les populations. Même si le chamois présente une tolérance plus grande à une large gamme de conditions climatiques, il devrait également être impacté par les changements actuels du climat (Brivio et al., 2016 ; Mason et al., 2014).

I. Augmentation des températures : des effets directs et indirects



Quelles
conséquences

1

Evolution temporelle de la ressource alimentaire

Comme pour le bouquetin, l'augmentation des températures printanières et estivales **influence la disponibilité, la quantité et la qualité des ressources alimentaires** disponibles pour les chamois (cf. Fiche Bouquetin). La plupart des grands mammifères sont dépendants des réserves accumulées au cours de la période de végétation, notamment pour assurer leur croissance et la reproduction. La végétation disponible au printemps influence la **masse corporelle des adultes et particulièrement celle des juvéniles, en pleine période de croissance** (Mason et al., 2014 ; Rughetti et al., 2012).

Ainsi, dans les Alpes italiennes, **un déclin de la taille des chevreaux et des éterlous (chevreau : 0 à 1 an et éterlou : 1 à 2 ans) ont été observés entre 2003 et 2009**. Cette diminution a également été observée pour les adultes (Rughetti et al., 2012).

Une altération de l'état corporel des juvéniles pourrait entraîner une diminution de leur survie et une baisse de la croissance démographique des populations (Mason et al., 2014).



© Joël VALENTIN

En cause ? De multiples facteurs :

- Rughetti et al. estiment que la **diminution de la masse corporelle serait liée aux modifications de la ressource, entraînées par l'élévation des températures printanières**.
- Mason et al. estiment que ce sont **plutôt des facteurs agissant directement sur les individus** qui sont en cause. Sous de fortes chaleurs, les jeunes chamois passeraient plus de temps au repos et donc moins de temps pour se nourrir, cela limiterait l'apport et le stockage d'énergie pour leur croissance.

En parallèle, la compétition intra-spécifique joue aussi un rôle dans la réduction de taille observée. En Italie, suite à des restrictions de la chasse, les populations de chamois sont en augmentation, ce qui augmente la compétition entre les individus. Les jeunes sont particulièrement sensibles à cette compétition, ce qui limite leur accès aux ressources et ainsi leur croissance (Mason et al., 2014).



© FAIVRE Thierry - Parc national de la Vanoise



Quelles
conséquences

2 Réduction de l'activité et déplacements journaliers

Comme chez le bouquetin des Alpes, l'augmentation des températures au dessus de 28 °C pousse les individus à se déplacer vers des zones plus fraîches et à réduire leur activité journalière. **Ces ajustements du comportement sont considérés comme coûteux sur le plan énergétique.** Les chamois passent aussi moins de temps à se nourrir et à accumuler des réserves, pourtant nécessaires pour passer l'hiver (Brivio et al., 2016 ; Mason et al., 2014). De par leur tolérance à une gamme de températures plus large, les chamois pourraient toutefois être moins sensibles que les bouquetins aux changements de températures (Mason et al., 2014)

Les déplacements journaliers sont également influencés par d'autres facteurs, comme la présence d'autres ongulés, notamment les ongulés domestiques. Ces différents paramètres rendent difficile la compréhension des facteurs qui dictent la sélection des zones d'alimentation (Mason et al., 2014).



3 Déplacements et réduction des zones d'alimentation

L'augmentation des températures et les changements des pratiques agro-pastorales impliquent une remontée en altitude de la forêt. La surface des pelouses alpines, sur lesquelles plusieurs herbivores, dont le chamois, s'alimentent, est en train de diminuer. Néanmoins, grâce à son régime diversifié, le chamois devrait être moins impacté que les autres ongulés de montagne par la remontée de la forêt (Espunyes et al., 2019).



Zone de combat*, lande à rhododendron
ferrugineux et arbustes : aulne vert, épicéas
(*limite entre les étages subalpin et alpin)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Brivio, F., Bertolucci, C., Tettamanti, F., Filli, F., Apollonio, M. & Grignolio, S. (2016). The weather dictates the rhythms : Alpine chamois activity is well adapted to ecological conditions. *Behavioral Ecology Sociobiology*, 70, 1291–1304.
- Espunyes, J., Lurgi, M., Büntgen, U., Bartolomé, J., Antonio Calleja, J., Gálvez-Cerón, A., et al. (2019). Different effects of alpine woody plant expansion on domestic and wild ungulates. *Global Change Biology*, 25, 1808–1819.
- Mason, T. H., Apollonio, M., Chirichella, R., Willis, S. G., & Stephens, P. A. (2014). Environmental change and long-term body mass declines in an alpine mammal. *Frontiers in zoology*, 11(1), 69.
- Mason, T.H., Stephens, P.A., Apollonio, M. & Willis, S.G. (2014). Predicting potential responses to future climate in an alpine ungulate : interspecific interactions exceed climate effects. *Global Change Biology*, 20, 3872–3882.
- Rughetti, M. & Festa-Bianchet, M. (2012). Effects of spring-summer temperature on body mass of chamois. *Journal of mammalogy*, 93, 1301–1307.



© Philippe BENOÎT - Parc national de la Vanoise

Le lagopède alpin est une **espèce inféodée aux milieux de haute altitude**. Étant donné ses caractéristiques écologiques particulières, il apparaît comme **très sensible aux variations climatiques actuelles**. Il est considéré comme une **espèce sentinelle** pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'avifaune de montagne (Bech, 2010 ; Novoa et al., 2014 ; ONCFS, 2010).



Aujourd'hui, deux grandes menaces pèsent sur les populations françaises : **le changement climatique et les activités humaines, notamment le développement des sports d'hiver** (Novoa et al., 2014). Les populations situées dans les limites les plus méridionales des aires de répartition, comme dans les Alpes et les Pyrénées, présentent des effectifs réduits et sont en situation d'isolement géographique. Elles sont donc **plus vulnérables** à l'évolution future du climat (ONCFS, 2010).

I. Réduction des habitats favorables au lagopède alpin

Quelles
conséquences

1 Contraction de l'aire de répartition

L'augmentation des températures induit un déplacement des étages de végétation vers les sommets ainsi qu'une réduction des espaces dans lesquels les lagopèdes peuvent se développer et se reproduire (Bech, 2010 ; Novoa et al., 2014). Entre 2000 et 2009, l'aire de répartition du lagopède alpin a ainsi considérablement diminué dans les Préalpes et les Alpes internes du Nord (Novoa et al., 2014).

En réponse, une remontée des populations de 100 m a été observée dans les Alpes françaises et dans les Pyrénées entre 1999 et 2011, à partir de données d'observations occasionnelles (Novoa et al., 2014). Ces résultats sont toutefois à nuancer car **aucune remontée significative** de l'habitat de reproduction du lagopède n'a été observée (Novoa et al., 2014).



Anticiper les conséquences en Vanoise

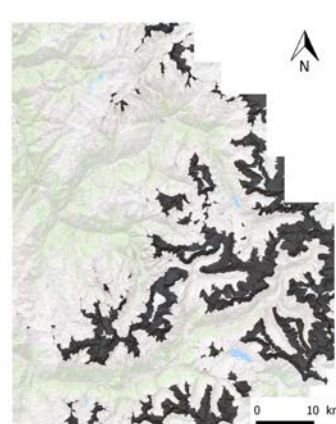
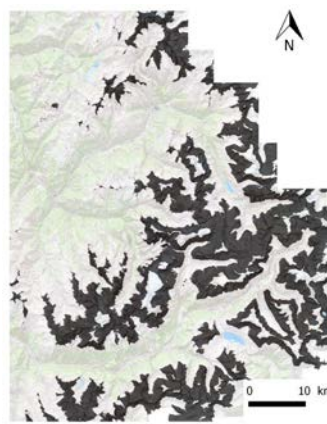
Les scénarios du GIEC prévoient une augmentation moyenne des températures annuelles comprise en 2 °C et 4.5 °C dans les Alpes.

Afin d'anticiper les conséquences des futures variations climatiques sur le lagopède alpin, une étude a été réalisée en Vanoise pour modéliser l'aire de présence potentielle du lagopède en période de reproduction selon deux scénarios :
+ 1.5 °C : avec une remontée de l'aire de présence de 230 m
+ 3 °C : une remontée de 460 m

Résultats ? Les différents scénarios prévoient :

- Une remontée de l'espèce en altitude,
- Une réduction des zones propices à sa reproduction,

- Une fragmentation des populations en îlots,
- Une perte de connectivité fonctionnelle et génétique (moins de déplacements et d'échanges entre les populations).



Aire de reproduction du lagopède suite à un réchauffement de + 1.5 °C et de + 3 °C (Debay, 2016. Parc national de la Vanoise).

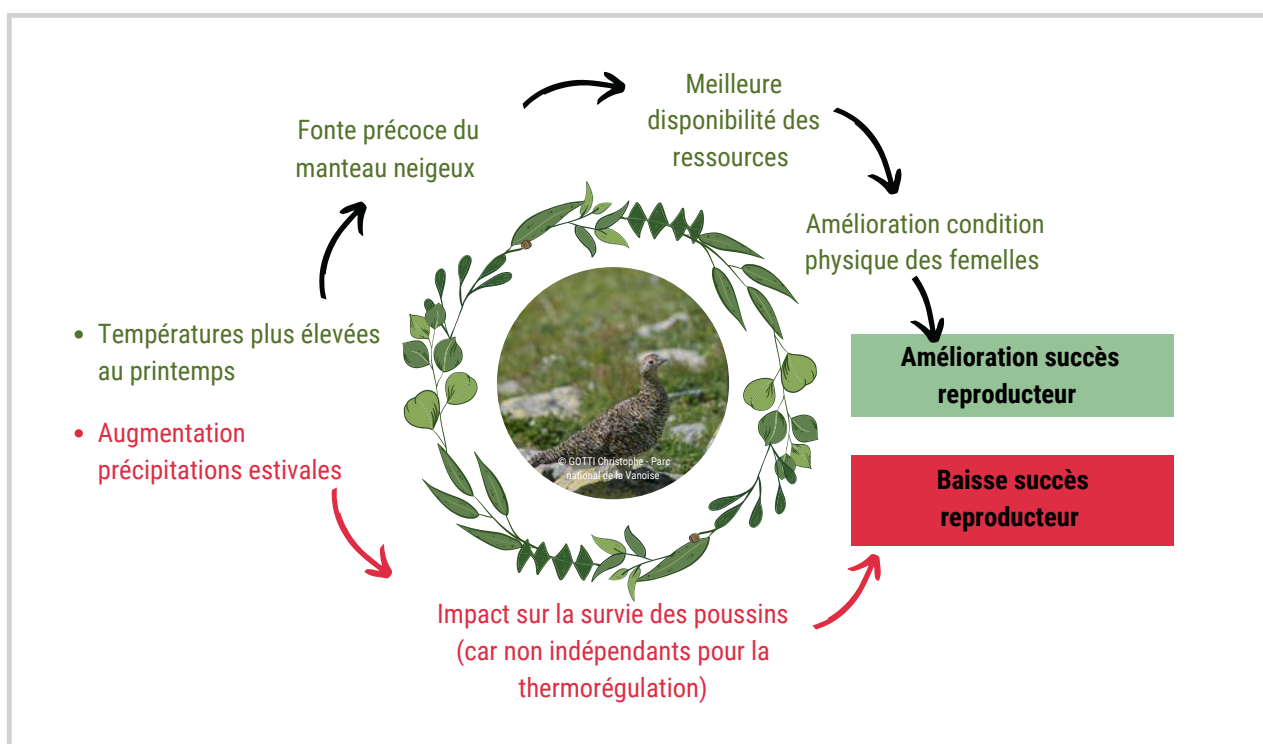
II. Succès de reproduction – impacts des variables climatiques sur la fécondité



1 Amélioration de la reproduction ?

Plus on monte en altitude et plus la fenêtre temporelle favorable à la reproduction diminue et l'imprévisibilité des conditions environnementales augmente. De par sa position extrême au sein du gradient altitudinal, on s'attend donc à ce que les **effets des conditions climatiques soient particulièrement marqués sur la fécondité de cette espèce** (Novoa et al., 2014).

D'après plusieurs auteurs, le changement climatique et notamment l'augmentation des températures pourraient avoir, à court terme, une influence positive sur le succès de la reproduction du lagopède (Bech, 2010 ; García-González et al., 2016 ; Novoa et al., 2014).



Variables climatiques et leurs influences sur la reproduction du lagopède

La précocité du déneigement et les précipitations pendant la période de l'éclosion sont les **deux variables clés du succès de la reproduction** dans les Alpes et dans les Pyrénées (Bech, 2010 ; García-González et al., 2016 ; Novoa et al., 2014).

- Une fonte précoce du manteau neigeux pourrait améliorer la disponibilité et la qualité des ressources, ce qui favoriserait la condition physique des femelles qui ont besoin d'énergie avant la ponte.
- Au contraire, comme pour le tétras-lyre, des précipitations trop importantes après l'éclosion, impactent la survie des poussins (García-González et al., 2016 ; Novoa et al., 2014).

Dans leur étude, Novoa et al. ont noté qu'une tendance à la baisse des précipitations estivales dans les Pyrénées semble avoir eu un effet positif sur la fécondité du lagopède entre 2000 et 2009. Au contraire la tendance à la hausse des précipitations dans les Préalpes du Nord semble avoir eu un effet négatif (Novoa et al., 2014).

Concernant les précipitations, l'identification de tendances est complexe, en raison de la forte variabilité interannuelle



2 Avancée de la période de reproduction ?

Certaines études ont démontré une avancée dans les dates d'éclosion chez le lagopède à queue blanche, espèce d'Amérique du Nord, qui semble en lien avec l'élévation des températures printanières. C'est également le cas pour d'autres tétraonidés (cf. Fiche tétras-lyre).

Cette avancée de la période de reproduction n'a cependant **pas été observée dans les Pyrénées et les Alpes sur le lagopède alpin**, où seule la date de la première éclosion semble être plus précoce, en lien avec la fonte plus précoce du manteau neigeux. Bien qu'aucune tendance significative n'ait été démontrée, il semble que la période des éclosions soit en effet en lien avec les dates de déneigement (Novoa et al., 2014).



© MOLLARD Mauricie - Parc national de la Vanoise

De manière générale, les précipitations et l'enneigement sont des variables qui présentent une forte variabilité interannuelle, il est également difficile d'estimer l'évolution de ces paramètres pour les prochaines décennies. Néanmoins, les scénarios d'évolution du climat prévoient une augmentation des épisodes climatiques extrêmes. Suivant les régions, cela pourrait avoir des répercussions importantes sur le succès de la reproduction du lagopède, très sensible aux paramètres climatiques (Novoa et al., 2014).



III. Quelles conclusions ?



À ce jour les effets du changement climatique sur le lagopède alpin sont difficiles à interpréter. Si aucun impact significatif n'a été observé sur la biologie de la reproduction, la plus grande menace qui pèse sur l'espèce semble être la réduction de l'aire de répartition projetée et ses conséquences associées. Face à l'augmentation des températures, on peut émettre l'hypothèse que des besoins en thermorégulation accrus pourraient impacter les autres fonctions physiologiques des individus comme la résistance aux pathogènes. Des études complémentaires sont donc à mettre en œuvre afin d'améliorer la compréhension des effets du changement climatique sur l'espèce et les réponses associées (Novoa et al., 2014).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Bech, N. (2010). *Génétique de la conservation et du paysage : étude des populations de lagopède alpin et de perdrix grise en France*. Thèse de doctorat, Université de Perpignan. 171 p.

García-González, R., Aldezabal, A., Laskurain, N.A., Margalida, A. & Novoa, C. (2016). Influence of Snowmelt Timing on the Diet Quality of Pyrenean Rock Ptarmigan (*Lagopus muta pyrenaica*) : Implications for Reproductive Success. *PLoS ONE*, 11.

Novoa, C., Desmet, J. F., Muffat-Joly, B., Arvin-Bérod, M., Belleau, E., Birck, C., & Losinger, I. (2014). Le lagopède alpin en Haute-Savoie, biologie des populations et impact des activités humaines. ONCFS/Asters/GRIFEM, Paris.

Rapport scientifique ONCFS. (2010). Démographie des populations françaises de lagopède : des résultats inquiétants. 43 p.



En Vanoise, le lièvre variable est une **espèce patrimoniale**, caractéristique de la haute montagne. Les populations alpines, notamment celles des Préalpes, sont particulièrement sensibles face aux changements actuels. Les modifications brutales de l'environnement rendent l'espèce très vulnérable, elle est donc considérée comme une **espèce indicatrice** de l'évolution des écosystèmes alpins (Rehnus et al., 2018 ; Schmidt, 2019).



I. Réduction de l'aire de répartition et isolement des populations

Quelles
conséquences

1 Modifications des conditions environnementales

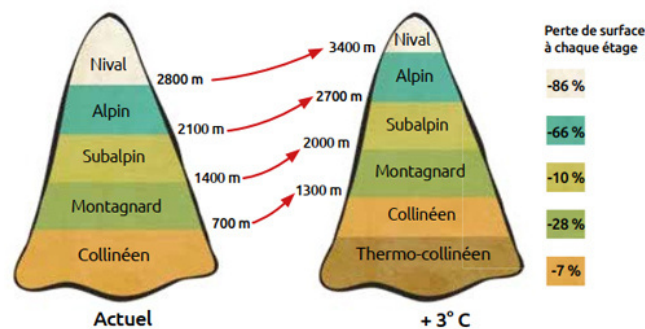
Les **étages alpin et subalpin**, dans lesquels se trouve l'habitat du lièvre variable, sont en train de remonter en altitude, phénomène qui risque de s'accélérer dans les prochaines décennies. Face à l'augmentation des températures, la **gamme thermique** dans laquelle le lièvre variable peut se développer est également en train de se réduire. De nombreuses études sont en cours pour identifier avec plus de précision quels sont les impacts qui touchent déjà l'espèce (Rehnus et al., 2018).

Pour retrouver des conditions favorables au développement et à la reproduction, le lièvre variable remontera probablement vers des altitudes plus élevées. Il **disparaîtra donc des altitudes les plus basses**, notamment dans les Alpes du Nord et les Alpes du Sud (Bisi et al., 2015 ; Rehnus et al., 2018).

Plus on monte en altitude et plus la surface disponible diminue. Dans les Alpes suisses, les modèles prédisent une réduction des habitats de **25 %** d'ici 2100 dans le scénario d'une augmentation puis d'une stabilisation des émissions de gaz à effet de serre. Cette réduction pourrait atteindre les **45 %** dans le scénario d'émissions le plus pessimiste (Rehnus et al., 2018).

Ce constat s'accompagnera probablement de nombreuses conséquences (Rehnus et al., 2018) :

- **fragmentation et isolement** des populations ; **perte de connectivité fonctionnelle** (connectivité entre les habitats et entre les individus)
- **perte de connectivité génétique** (moins d'échanges, augmentation de la consanguinité) ;
- **diminution potentielle de la taille des populations en limite d'aire de répartition** ;
- augmentation du **risque d'extinction**.



© EducAlps (D'après Theurillat & Guisan, 2001)





Quelles
conséquences

Dans les Alpes, on trouve deux espèces de lagomorphes :

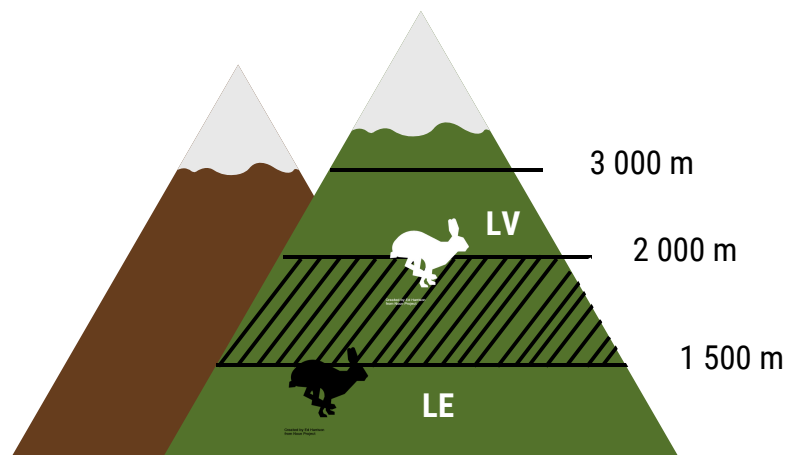
- le **lièvre variable** (*Lepus timidus*) entre 1 500 et 3 000 m d'altitude ;
- le **lièvre d'Europe** (*Lepus europaeus*) en dessous de 2 000 m d'altitude ;

Ces deux espèces vivent à des altitudes différentes et ne **coexistent** que dans une étroite bande située entre **1 500 et 2 000 m** d'altitude (Bisi et al., 2015 ; Rehnus et al., 2018).

2 Modifications des interactions

Chez le lièvre variable et le lièvre d'Europe, la compétition semble être **arbitrée par le climat**.

Avec le changement climatique et la remontée des étages de végétation, le lièvre d'Europe **pourrait coloniser de nouvelles surfaces**, là où auparavant les conditions environnementales étaient trop contraignantes. La limite altitudinale de la zone de sympatrie (zone où les deux espèces coexistent) semble remonter (Bisi et al., 2015).



Dans les Alpes italiennes

Bisi et al., suggèrent que le changement climatique aura un impact sur la distribution du lièvre variable, mais que la distribution du lièvre d'Europe, elle, ne devrait pas être impactée à brève échéance (Bisi et al., 2015). Les facteurs déterminants pour la répartition du lièvre d'Europe sont la température et les précipitations hivernales, qui à plus haute altitude tombent sous forme de neige. Bien que les conditions hivernales se modifient, **elles restent pour l'instant trop rigoureuses pour permettre à cette espèce d'élargir son aire de répartition** (Bisi et al., 2015).

Et en Vanoise ?

Le lièvre variable est une espèce nocturne et discrète. Son **homochromie** (adéquation entre le pelage et la couleur du milieu) et sa faible activité diurne rendent son observation et l'estimation des paramètres démographiques particulièrement difficiles via des techniques d'observations classiques.

Une méthode de suivi non invasive a été mise en place sur quatre sites de référence en Vanoise. Ce protocole se base sur la récupération puis l'analyse génétique de fèces.



Récolte de fèces de lièvre variable dans le cadre du
protocole de suivi génétique de l'espèce

II. Quand la neige vient à manquer

Un pelage à chaque saison

La couleur de pelage chez le lièvre variable change selon la période de l'année afin de se fondre dans le paysage et d'éviter d'être détecté par les prédateurs. Il est donc particulièrement **sensible aux variations de son environnement** (Mills et al., 2013 ; Pedersen et al., 2017 ; Zimova et al., 2016).



Pelage d'hiver

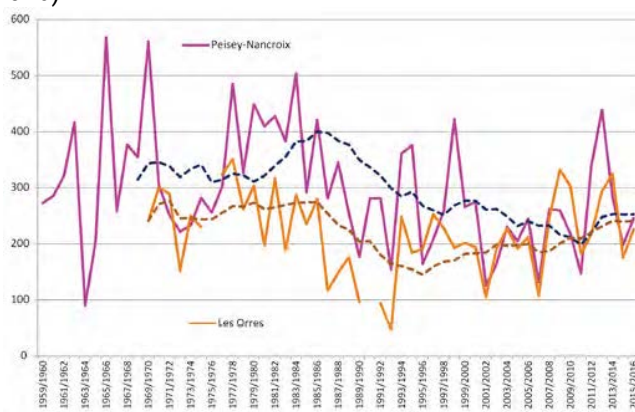


Pelage d'été



Modification des pressions de sélection

Avec l'arrivée plus tardive de la neige à l'automne, une baisse des cumuls et une fonte précoce au printemps, la période d'enneigement se décale et se réduit dans l'hémisphère Nord (Mills et al., 2013 ; Zimova et al., 2016).

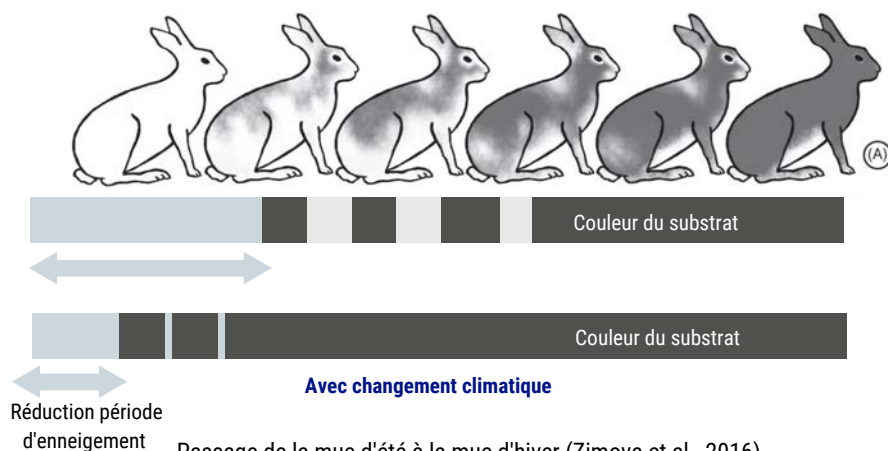


Évolution des cumuls à Peisey-Nancroix et Les Orres depuis 1960 (Chaix et al., 2017).

Face à ces modifications accrues de l'environnement, certains caractères adaptatifs développés par les espèces ne correspondent plus aux nouvelles conditions environnementales et peuvent devenir **contre-sélectifs**, autrement dit, ils peuvent désavantager l'individu dans son environnement (Zimova et al., 2016).

Des études réalisées en Norvège démontrent que la **mortalité des lièvres est plus élevée dans les zones où la présence de neige est moindre**. Il en est de même pour le lièvre d'Amérique, espèce similaire au lièvre variable. Ainsi les changements observés du manteau neigeux pourraient entraîner un décalage entre la couleur du pelage et la couleur du substrat.

Blanc sur fond noir, **le lièvre variable serait davantage sujet à la prédation**, ce qui risque de modifier **l'équilibre démographique** de l'espèce (Mills et al., 2013 ; Pedersen et al., 2017 ; Zimova et al., 2016).



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Bisi, F., Wauters, L.A., Preatoni, D.G. & Martinoli, A. (2015). Interspecific competition mediated by climate change: which interaction between brown and mountain hare in the Alps? *Mammalian Biology*, 80, 424–430.

Cavailhes, J. (2020). Suivi génétique du Lièvre variable, Hivers 2017, 2018 et 2019. Parc national de la Vanoise, 18 p.

Giska, I., Farelo, L., Pimenta, J., Seixas, F.A., Ferreira, M.S., Marques, J.P., et al. (2019). Introgression drives repeated evolution of winter coat color polymorphism in hares. *PNAS*, 116, 24150–24156.

Mills, L.S., Zimova, M., Oyler, J., Running, S., Abatzoglou, J.T. & Lukacs, P.M. (2013). Camouflage mismatch in seasonal coat color due to decreased snow duration. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 110, 7360–7365.

Pedersen, S., Odden, M. & Pedersen, H.C. (2017). Climate change induced molting mismatch? Mountain hare abundance reduced by duration of snow cover and predator abundance. *Ecosphere*, 8(3).

Rehnus, M., Bollmann, K., Schmatz, D.R., Hackländer, K. & Braunisch, V. (2018). Alpine glacial relict species losing out to climate change: The case of the fragmented mountain hare population (*Lepus timidus*) in the Alps. *Global Change Biology*, 24, 3236–3253.

Schmitd, R. (2019). *Estimation des paramètres démographiques du lièvre variable (Lepus timidus) en Savoie, à partir d'un échantillonnage génétique non invasif*. Rapport de stage, FDC73. 33 p.

Zimova, M., Mills, L.S. & Nowak, J.J. (2016). High fitness costs of climate change-induced camouflage mismatch. *Ecology Letters*, 19, 299–307.



© BENOIT Philippe - Parc national de la Vanoise



© BENOIT Philippe - Parc national de la Vanoise

La marmotte est une autre espèce emblématique des Alpes. En raison de son **adaptation à des conditions extrêmes et très spécifiques**, la marmotte est également **très sensible au changement climatique** (Canale et al., 2016). Sa longévité (jusqu'à 16 ans) permet de réaliser sur le long terme des suivis précis des individus et des populations (Tafani, 2013). En Vanoise, le suivi réalisé depuis 1990 dans la Réserve naturelle de la Grande Sassièrre a permis de recueillir des données précieuses pour améliorer la connaissance du changement climatique et de ses impacts sur les marmottes (Tafani, 2013).



Organisation sociale des marmottes



Pour survivre à la rigueur de l'hiver, la marmotte alpine hiberne en **groupes familiaux** (Rézouki, 2018 ; Rézouki et al., 2016 ; Tafani, 2013). Ces groupes sont constitués d'un couple reproducteur dominant et de leurs subordonnés (Rézouki, 2018 ; Rézouki et al., 2016 ; Tafani, 2013). La dispersion des jeunes est retardée les premières années de leur vie durant lesquelles ils participent à la thermorégulation du terrier pendant l'hiver. Un avantage qui permet d'améliorer la survie des marmottons nés pendant l'été (Rézouki, 2018 ; Rézouki et al., 2016 ; Tafani, 2013).



© FOLLIER Patrick - Parc national de la Vanoise

I. Des effets contrastés



© HERRMANN Mylène - Parc national de la Vanoise

Prairie fleurie dans le vallon de la Sassièrre

1

Modifications des conditions printanières et estivales

À première vue, l'**augmentation des températures au printemps permettrait à la marmotte de sortir plus rapidement d'hibernation**. Les marmottes, en particulier les femelles, pourraient ainsi accumuler plus de réserves et seraient en **meilleure condition pour la reproduction et la survie lors du prochain hiver** (Tafani, 2013). Cependant, des températures estivales élevées, comme attendues dans les prochaines décennies, entraînent une sénescence plus précoce de la végétation et donc des ressources de mauvaise qualité nutritionnelle, limitant l'accumulation des réserves (Rézouki, 2018 ; Rézouki et al., 2016).

2

Modifications des conditions hivernales

L'effet partiellement positif des conditions printanières est également contrebalancé par les conditions hivernales. **Le manteau neigeux connaît actuellement une réduction** dans les Alpes suite à l'augmentation des températures et à la modification des précipitations hivernales. Sur le site de la Grande Sassièrre, les températures **ont augmenté de 3.4 °C en 10 ans** et le manteau neigeux a **diminué d'environ 37 cm**. À travers son **rôle isolant**, le manteau neigeux permet de maintenir le terrier à une température optimale, ce qui limite les dépenses énergétiques des marmottes pendant l'hibernation. Les terriers des marmottes **sont donc plus exposés à la rigueur de l'hiver**, ce qui va avoir différentes conséquences (Tafani, 2013).



© BALAIS Christian - Parc national de la Vanoise

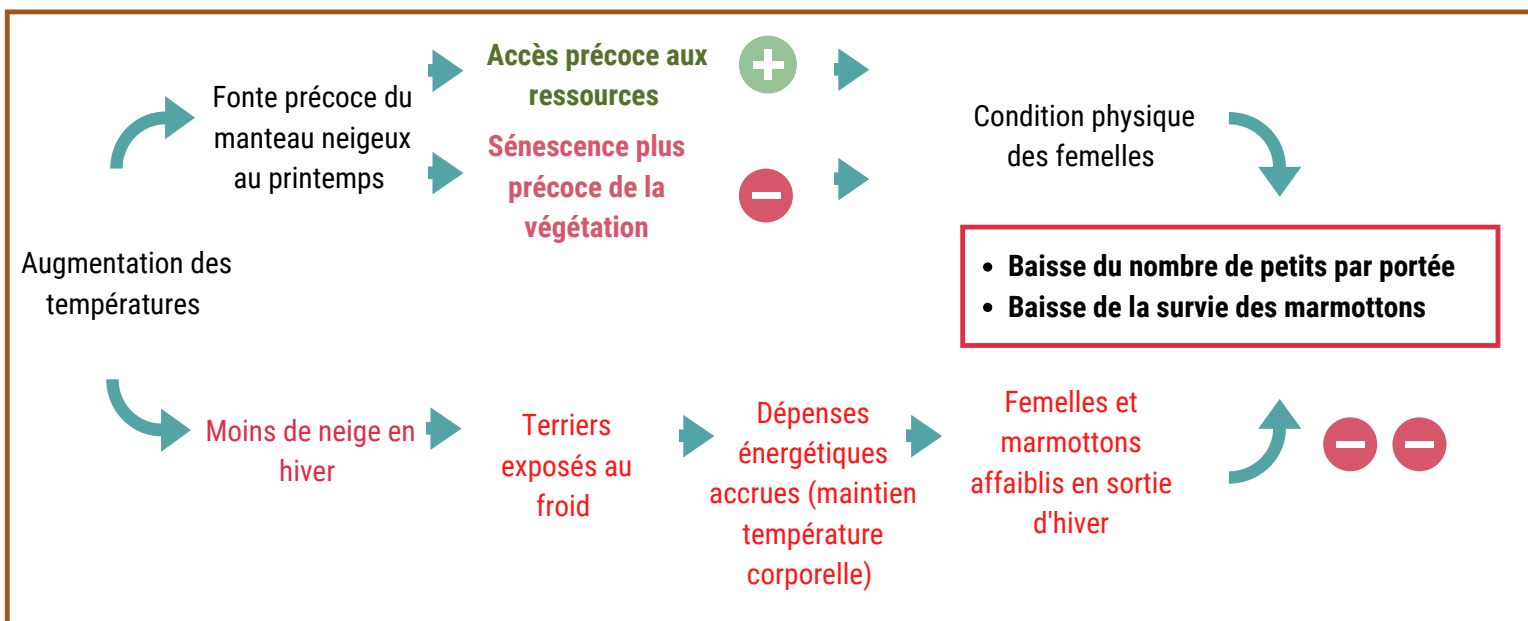
Le vallon de la Réserve naturelle de la Grande Sassièrre



II. Quelles conséquences ?

Conséquences sur le succès de la reproduction

Le suivi régulier des marmottes de la Réserve naturelle de la Grande Sassière ont mis en évidence différentes conséquences :



Impacts des conditions printanières et hivernales sur la reproduction de la marmotte alpine

Conséquences sur l'organisation sociale

Le changement climatique affecte également l'organisation sociale des marmottes à travers son impact sur les paramètres de reproduction. En limitant le nombre de petits par portée ainsi que leur survie, il impacte le nombre de subordonnés qui participeront à la thermorégulation du terrier, ce qui vient amplifier les impacts cités précédemment (Rézouki, 2018 ; Rézouki et al., 2016).

Avec le changement climatique, les avantages d'une telle organisation risquent de changer. En effet, la baisse des températures dans les terriers limite l'efficacité de l'aide apportée par les subordonnés. Ces derniers perdent également beaucoup d'énergie à travers le rôle de thermorégulation. Ils tirent ainsi moins de bénéfices.

De plus avec la diminution de la population, davantage de territoires vacants sont disponibles pour les jeunes adultes. Dans ce contexte, les avantages d'une dispersion plus précoce dépassent ceux de la coopération (Rézouki, 2018).



Des contraintes qui dictent la dispersion des juvéniles

En contexte alpin, la saison de croissance est courte. Les jeunes marmottes ont donc besoin de plusieurs étés afin d'être dans de bonnes conditions physiques pour survivre et accéder à la reproduction. En effet, le taux de survie augmente avec l'âge et la croissance. C'est en partie de ces contraintes que découle l'organisation sociale des marmottes (Rézouki, 2018).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Canale, C.I., Ozgul, A., Allainé, D. & Cohan, A. (2016). Differential plasticity of size and mass to environmental change in a hibernating mammal. *Global Change Biology*, 22, 3286–3303.

Rézouki, C. (2018). *The Influence of Lifestyle on Demographic Responses to Climate Change: The Alpine Marmot as a Case Study*. Thèse de doctorat, Université de Lyon, 293 p.

Rézouki, C., Tafani, M., Cohan, A., Loison, A., Gaillard, J. M., Allainé, D., & Bonenfant, C. (2016). Socially mediated effects of climate change decrease survival of hibernating Alpine marmots. *Journal of Animal Ecology*, 85(3), 761-773.

Tafani, M. (2013). *Traits d'histoire de vie et démographie face aux changements climatiques en milieu alpin : l'exemple de la marmotte alpine (Marmota marmota)*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard – Lyon 1, 211 p.





© PLOYER Jean-Yves - Parc national de la Vanoise



De par leur capacité de mobilité élevée, les oiseaux réagissent rapidement aux variations de leur environnement. En ce sens, ils sont considérés comme de bons indicateurs du changement climatique (Bellard et al., 2012). Dans les zones de montagne, l'abandon du pastoralisme ou le dérangement par les activités touristiques, exercent déjà des pressions sur les populations d'oiseaux (Bani et al., 2019 ; Chamberlain et al., 2013 ; Lehikoinen et al., 2019). Le changement climatique vient s'ajouter à ces pressions, ce qui rend parfois difficile la distinction entre les impacts du changement climatique et ceux issus d'autres facteurs (Scridel et al., 2018).

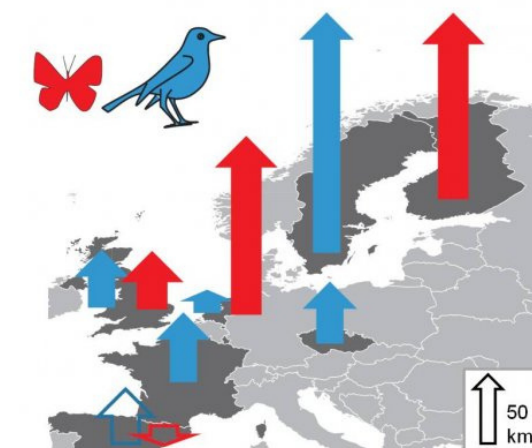
I. Des réponses dans l'espace



Quelles
conséquences

1 Migrations latitudinales

Le changement climatique modifie les conditions environnementales dans lesquelles les oiseaux vivent. Une des stratégies d'adaptation pour lutter contre le changement climatique est de déplacer son aire de répartition vers des latitudes plus élevées (Cremonese et al., 2019 ; Dubos, 2017 ; Lehikoinen et al., 2019 ; Scridel et al., 2018). Cela permet de retrouver les conditions optimales pour la survie et la reproduction (Cremonese et al., 2019). Ainsi, Devictor et al., ont observé un **déplacement des aires de répartition de 91 km vers le Nord** pour un grand nombre d'oiseaux et de papillons d'Europe. Néanmoins, ce déplacement vers le Nord des aires de répartition ne suit pas exactement les changements de températures moyennes annuelles mesurées, puisque ces dernières se sont décalées de 249 km vers le Nord en 20 ans (Devictor et al., 2012).



Déplacements vers le Nord des aires de répartition des oiseaux et des papillons en Europe (Devictor et al., 2012).



© MOLLARD Maurice - Parc national de la Vanoise

2 Migrations altitudinales

De nombreuses études ont aussi enregistré des déplacements le long des gradients altitudinaux (Archaux, 2004 ; Scridel et al., 2018). En réponse à l'augmentation des températures, des déplacements vers le haut sont pressentis. Toutefois, les résultats divergent selon les espèces, les périodes et les sites d'études. Le **Suivi Temporel des Oiseaux de Montagne (STOM)** a justement été mis en place afin de documenter et d'identifier ces migrations altitudinales.

Avec l'altitude, la surface d'habitats disponible diminue en raison de la forme conique des montagnes. Les possibilités de dispersion altitudinale sont ainsi limitées (Bellard et al., 2012 ; Scridel et al., 2018). En conséquence, les aires de répartition des oiseaux sont amenées à diminuer (cf. Fiche lagopède alpin), les populations deviennent alors isolées et plus vulnérables. En Europe, **un déclin de l'abondance de oiseaux de montagne 7 %** a déjà été enregistré entre 2002 et 2014 pour les oiseaux de montagne (Lehikoinen et al., 2019).



Attention ces changements peuvent aussi être influencés par l'altération des habitats, les pratiques humaines ou les interactions inter et intraspécifiques (Archaux, 2004 ; Scridel et al., 2018).

II. Des réponses dans le temps



Quelles
conséquences

Avancées phénologiques

Pour faire face aux nouvelles conditions environnementales, certaines espèces d'oiseaux modifient leurs comportements et leurs activités saisonnières (Archaux, 2004 ; Cremonese et al., 2019 ; Scridel et al., 2018). On observe par exemple une avancée du retour de migration, à la fois pour les espèces qui migrent sur des courtes distances et celles sur les longues distances (Vittoz et al., 2013). L'arrivée des oiseaux migrateurs a ainsi avancé d'environ 15 jours en 30 ans (Cremonese et al., 2019).



© HERRMANN Mylène - Parc national de la Vanoise

La mésange noire, toujours en rythme

Les bilans du programme Phénoclim, du Centre de Recherches sur les Écosystèmes d'Altitude (CREA), démontrent une avancée des dates de pontes (environ **+ 2,5 jours** en 2019) chez la mésange noire (CREA, 2019 - Bilan printemps 2019). Chez cette espèce, la ponte est fortement liée aux températures printanières qui vont dicter la phénologie des arbres et ainsi la disponibilité des chenilles, principale ressource alimentaire des oisillons (Bison, 2017).

Des changements phénologiques qui entraînent des décalages

Ces changements d'activités peuvent entraîner des déclinés importants, notamment si les tendances phénologiques créent des décalages avec la disponibilité des ressources alimentaires (Scridel et al., 2018). Dans les écosystèmes alpins, il est primordial pour les animaux de synchroniser la période de reproduction et d'élevage des juvéniles avec la période, très courte, où les ressources sont abondantes et de bonne qualité (Asse et al., 2018 ; Resano-Mayor et al., 2019). Ces périodes sont en partie déterminées par la fonte de la neige (Scridel et al., 2018).

Le merle à plastron, déboussolé



© IMBERDIS Ludovic - Parc national de la Vanoise

Pour le **merle à plastron**, la neige joue un rôle primordial pour la disponibilité des ressources. Avec la fonte des neiges, les sols sont plus humides et facilement pénétrables, la végétation est également plus basse, ce qui facilite la recherche d'invertébrés. Avec l'augmentation des températures, la fonte du manteau neigeux est de plus en plus précoce, ce qui risque de créer un **décalage entre la période de reproduction du merle à plastron et le pic de la disponibilité des proies pour l'alimentation des jeunes** (Barras et al., 2020).

III. Des changements morphologiques

Quelles
conséquences

Des variations liées au climat ?

Certains auteurs font l'hypothèse que le changement climatique influence également les traits morphologiques des espèces, notamment des espèces **endothermes***. De nombreux traits, comme la taille des individus, sont directement liés au climat. En effet, une espèce vivant dans des conditions climatiques froides aura tendance à être plus imposante car cela représente un avantage pour la thermorégulation. C'est la règle de Bergmann.

La taille corporelle des oiseaux devrait donc diminuer sous des climats plus chauds et plus secs (Delgado et al., 2019).

***endotherme** : désigne les animaux à sang chaud, dont la température corporelle reste constante, indépendante de celle du milieu externe.

****plasticité** : aptitude d'une espèce à s'adapter physiologiquement (et morphologiquement) à des conditions écologiques situées aux limites de son intervalle de tolérance pour les facteurs considérés.



Néanmoins, il est difficile de mettre en évidence le lien entre ces variations morphologiques et le changement climatique puisqu'elles sont également influencées par une diversité de facteurs. Il est encore plus complexe de comprendre les mécanismes sous-jacents et de savoir si ces variations sont la résultante de processus évolutifs ou si elles sont le reflet de la **plasticité**** des organismes (Bellard et al., 2012 ; Delgado et al., 2019).

Nouveau look pour une nouvelle survie

Delgado et al. ont démontré des changements morphologiques sur plusieurs sous-espèces de niverolle alpine. Pour cela, ils ont utilisé des spécimens de collections de muséums sur une période de 100 ans. Ils ont ainsi observé :

- **une diminution de la longueur du tarse**, un indicateur de la taille corporelle,
- **une modification de la saturation de mélanine**, principal pigment à l'origine des colorations animales. Certains auteurs estiment que les individus plus sombres devraient être favorisés dans un contexte de changement climatique. Une coloration plus foncée pourrait en effet améliorer la thermorégulation et la protection contre le rayonnement solaire.



Ces variations morphologiques semblent être en lien avec l'augmentation des températures et la diminution des précipitations, bien que d'autres facteurs semblent également influencer ces observations (Delgado et al., 2019).

La taille corporelle est un paramètre biologique important qui influence de nombreux aspects du cycle de vie des individus, comme la survie ou la reproduction. Des changements de taille corporelle pourraient donc avoir des **conséquences physiologiques importantes**. Ces variations pourraient également modifier les interactions entre les organismes et impacter la dynamique des populations (Delgado et al., 2019 ; Dubos, 2017).

Envie d'en savoir davantage sur le changement climatique et les réponses des oiseaux ?

Nicolas DUBOS vous en dit plus en 3 minutes top chrono dans le cadre du concours de vulgarisation "Ma thèse en 180 secondes"

<https://www.youtube.com/watch?v=TktDmhQkc8Y>





RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Archaux, F. (2004). Breeding upwards when climate is becoming warmer: no bird response in the French Alps. *Ibis*, 146, 138–144.
- Asse, D., Chuine, I., Vitasse, Y., Yoccoz, N.G., Delpierre, N., Badeau, V., et al. (2018). Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 220–230.
- Bani, L., Luppi, M., Rocchia, E., Dondina, O. & Orioli, V. (2019). Winners and losers: How the elevational range of breeding birds on Alps has varied over the past four decades due to climate and habitat changes. *Ecology and Evolution*, 9, 1289–1305.
- Bison, M. (2017). Reproduction des mésanges : les risques entre chaud et froid. Consulté sur : <https://blog.creamontblanc.org/?p=525>
- Centre de Recherches sur les Écosystèmes Alpains (CREA). (2019). Phénoclim -Bilan printemps 2019, 8 p.
- Chamberlain, D.E., Negro, M., Caprio, E. & Rolando, A. (2013). Assessing the sensitivity of alpine birds to potential future changes in habitat and climate to inform management strategies. *Biological Conservation*, 167, 127–135.
- CREA Mont-blanc. Bilan printemps 2019 - Phenoclim. 2019.
- Cremonese, E., Carlson, B., Filippa, G., Pogliotti, P., Alvarez, I., Fosson JP., et al. (2019). AdaPTMont-Blanc : Rapport Climat: Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines. Rédigé dans le cadre du projet AdaPT Mont-Blanc financé par le Programme européen de coopération territoriale Alcotra Italie-France 2014-2020. 101 p.
- Delgado, M. del M., Bettega, C., Martens, J. & Päckert, M. (2019). Ecotypic changes of alpine birds to climate change. *Scientific Reports*, 9, 16082.
- Dubos, N. (2017). *Phenotypic response to environmental fluctuation: How does climate influence body size in French songbirds?*, Thèse de doctorat, Muséum national d'histoire naturelle - Ecole Doctorale Sciences de la Nature et de l'Homme. 246 p.
- Lehikoinen, A., Brotons, L., Calladine, J., et al. (2019). Declining population trends of European mountain birds. *Global Change Biology*. 25: 577– 588.
- Resano-Mayor, J., Korner-Nievergelt, F., Vignali, S., Horrenberger, N., Barras, A.G., Braunisch, V., et al. (2019). Snow cover phenology is the main driver of foraging habitat selection for a high-alpine passerine during breeding: implications for species persistence in the face of climate change. *Biodiversity and Conservation*, 28, 2669–2685.
- Resano-Mayor, J., Korner-Nievergelt, F., Vignali, S., Horrenberger, N., Barras, A.G., Braunisch, V., et al. (2019). Snow cover phenology is the main driver of foraging habitat selection for a high-alpine passerine during breeding: implications for species persistence in the face of climate change. *Biodiversity and Conservation*, 28, 2669–2685.
- Scridel, D., Brambilla, M., Martin, K., Lehikoinen, A., Iemma, A., Matteo, A., et al. (2019). A review and meta-analysis of the effects of climate change on Holarctic mountain and upland bird populations. *Ibis*, 160, 489–515.
- Vittoz, P., Cherix, D., Gonsseth, Y., Lubini, V., Maggini, R., Zbinden, N., et al. (2013). Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A review. *Journal for Nature Conservation*, 21, 154–162.



© FAIVRE Thierry - Parc national de la Vanoise

Le tétras-lyre est une **espèce emblématique** des milieux de montagne et boréaux. Dans les Alpes, il occupe l'étage subalpin, entre **1 400 et 2 300 m d'altitude**, à la limite entre les forêts d'altitude et les pelouses alpines, zone de transition qui abrite une grande richesse faunistique et floristique. Le tétras-lyre est considéré comme une **espèce parapluie** pour ces milieux, indicatrice de la richesse et de l'état de conservation (Viterbi et al., 2015).



Étant donnée leur situation en limite d'aire de répartition, les populations alpines sont considérées comme particulièrement vulnérables aux changements environnementaux.

La modification des habitats, le dérangement et l'impact des activités humaines ainsi que le changement climatique sont autant de menaces qui pèsent sur les populations alpines. Bien que les populations semblent stables, une tendance au déclin plus ou moins marquée est observée depuis quelques décennies, notamment en périphérie de l'aire de répartition (Gazal et al., 2019 ; Barnagaud et al., 2011).

I. Conditions environnementales et reproduction

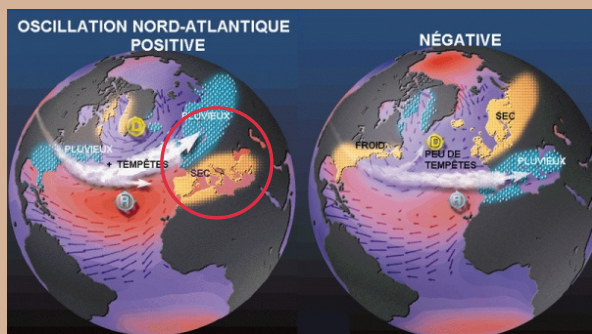


1 Amélioration du succès de la reproduction

Plusieurs études démontrent l'importance des conditions météorologiques sur la dynamique de population du tétras-lyre (Barnagaud et al., 2011 ; Viterbi et al., 2015). Dans les Alpes françaises, les longues séries de données recueillies par l'OGM et l'ONCFS ont permis d'étudier de plus près les paramètres démographiques du tétras-lyre et de les comparer avec l'évolution des paramètres climatiques (Leclerc & Ménoni, 2019).

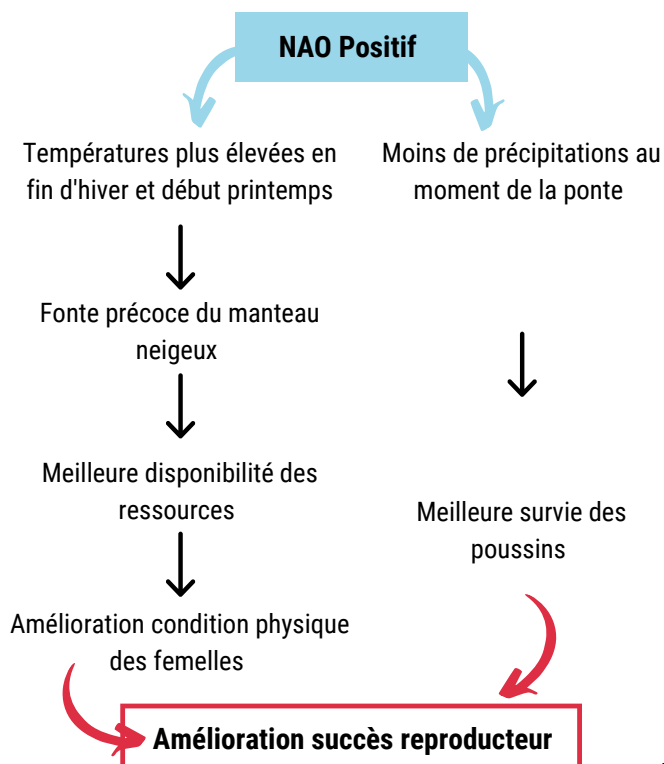
Résultats ? Une amélioration du succès de la reproduction a été observée. En cause ? Un indice positif de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO).

L'Oscillation Nord Atlantique (NAO)



C'est une oscillation atmosphérique qui influence le climat de l'Europe occidentale, principalement en hiver. Cette oscillation est renseignée par des indices, principalement **positifs** lors des 30 à 40 dernières années. Une **tendance qui est liée au changement climatique actuel**.

Un **indice positif** est associé à un temps chaud et sec en fin d'hiver et début de printemps (Barnagaud et al., 2011).





Les paramètres climatiques ont donc une influence marquée sur la dynamique des populations de tétras-lyre, notamment à travers leur rôle sur la fécondité des femelles et la survie des poussins (Barnagaud et al., 2011 ; Viterbi et al., 2015).

Selon l'évolution des paramètres climatiques, les effets sur le tétras-lyre ne seront donc pas les mêmes. Si l'augmentation des températures au printemps semble avoir un effet positif, des températures hivernales plus élevées et une diminution des précipitations sous forme de neige pourraient fortement impacter la survie des individus. La neige joue un rôle important pour la survie du tétras-lyre. Pendant l'hiver, il réduit la perte de chaleur en s'isolant dans des igloos de neige et actuellement le manteau neigeux est en réduction dans l'hémisphère Nord (Viterbi et al., 2015)



Néanmoins, des incertitudes résident encore concernant l'évolution des conditions climatiques, notamment au niveau des précipitations neigeuses (Viterbi et al., 2015, Leclerc & Ménoni, 2019).



© F. MOSCA

2

Avancée de la période de reproduction ?

En Norvège, Wegge et al. ont noté une avancée du printemps de 3 semaines en 38 ans de suivis, en lien avec l'élévation des températures. **En réponse**, il semble que la **période d'accouplement des tétras-lyres s'est elle aussi décalée, exactement de 4 à 5 jours** (Wegge et al., 2017).

Le cycle de vie du tétras-lyre est également régi par la photopériode, **l'ajustement du comportement reproducteur est donc limité** (Wegge et al., 2017). Ainsi, une arrivée du printemps de plus en plus précoce pourrait à terme **entraîner un décalage de plus en plus marqué entre le début de la reproduction et la croissance des plantes**. Possiblement, moins de ressources de bonne qualité seraient disponibles pour les femelles, ce qui affectera leur condition physique et par la suite la survie des poussins (Barnagaud et al., 2011).

Quelles
conséquences

L'exemple du grand tétras en Écosse

Le suivi régulier des populations du grand tétras en Écosse a permis d'identifier le changement climatique comme une des causes principales de la diminution des populations. Suite à l'élévation des températures et à l'avancée du printemps, le pic de ponte des poules semble décalé par rapport à la floraison de la linaigrette, qui constitue la quasi-totalité de l'apport de ressources pour les femelles. Les femelles sont donc en moins bonne condition physique, ce qui impacte le développement des ovules et par la suite la survie des poussins (Leclerc & Ménoni, 2019).



© STORCK Frantz - Parc national de la Vanoise

II. Remontée de la forêt et réduction des habitats

Quelles conséquences

Suite au changement climatique et aux changements de pratiques pastorales, les étages de végétation (notamment la forêt) remontent vers les sommets. L'habitat du tétras-lyre, à l'interface entre la limite supérieure de la forêt et les pelouses alpines, pourrait fortement se réduire dans les prochaines décennies (Leclerc & Ménoni, 2019).



© Joël VALENTIN

III. Des résultats contrastés selon les régions, les études



© BENOIT Philippe - Parc national de la Vanoise

Selon les régions, les sites d'études ou la période étudiée, les conclusions ne sont pas les mêmes. Les modifications du climat ne s'expriment pas de la même manière et peuvent avoir des impacts très différents. Si une amélioration du succès de la reproduction semble avoir eu lieu dans les Alpes françaises, l'effet inverse est par exemple observé en Finlande (Leclerc & Ménoni, 2019).

De manière générale, les populations alpines de tétraonidés semblent moins impactées par le changement climatique que celles d'Europe du Nord. En effet, le contexte alpin, de par sa diversité d'habitats, de micro-contextes, offre une variété d'écosystèmes, de situations écologiques, ce qui permet aux oiseaux de compenser en partie les effets du changement climatique, notamment les impacts sur la végétation. Ils disposent ainsi d'une large gamme de stades de développement des plantes et peuvent satisfaire leurs besoins vitaux.

Les populations alpines de tétraonidés sont également exposées à un climat plus variable que celles présentes en Europe du Nord. Elles possèdent probablement une tolérance plus importante aux variations climatiques (Leclerc & Ménoni, 2019).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Barnagaud, J.-Y., Crochet, P.A., Magnani, Y., Bernard Laurent, A., Menoni, E., Novoa, C., et al. (2011). Short-term response to the North Atlantic Oscillation but no long-term effects of climate change on the reproductive success of an alpine bird. *Journal of Ornithology*, 152, 631–641.

Leclerc, B. & Menoni, E. (2019) Effets des changements climatiques sur l'écologie de quelques Tétraonidés. *Revue scientifique Bourgogne-Franche-Comté Nature*, 29, 168-186.

Gazal, G., Montadert, M., Gomez, N. & Cavailhes, J. (2019). Bilans des captures de Tétras-lyre dans le Parc national de la Vanoise. 31p.

Viterbi, R., Imperio, S., Alpe, D., Bosser-Peverelli, V. & Provenzale, A. (2015). Climatic control and population dynamics of black grouse (*Tetrao tetrix*) in the Western Italian Alps. *Journal of Wildlife Management*, 79, 156–166.

Wegge, P. & Rolstad, J. (2017). Climate change and bird reproduction: warmer springs benefit breeding success in boreal forest grouse. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284, 20171528.



© Philippe BENOIT - Parc national de la Vanoise

La flore de Vanoise abrite une grande richesse dont plus de 2 000 espèces de plantes à fleurs et de fougères. Le changement climatique pourrait avoir de grandes conséquences pour cette diversité. Néanmoins, ses effets ne sont pas les mêmes selon les espèces et les localités. Tandis que certaines espèces semblent bénéficier de l'évolution actuelle du climat, d'autres sont menacées par une augmentation trop marquée des températures.



I. Avancées phénologiques



Quelles
conséquences

1 Un printemps plus précoce

En montagne, la **hausse des températures printanières** est couplée à une **fonte plus précoce** du manteau neigeux. Face à cette évolution des conditions environnementales, la croissance de certaines espèces démarre plus tôt. **Une avancée de 2 semaines** a ainsi été enregistrée entre 1982 et 2011, avancée qui semble plus prononcée pour les hautes altitudes (Asse et al., 2018 ; Cremonese et al., 2019 ; Matteodo et al., 2016 ; Winkler et al., 2018).

Résultat ? La **durée de la saison de végétation s'est allongée** au cours des dernières décennies, de 2 à 4 semaines par rapport aux années 1960 (Cremonese et al., 2019).



© RENAUD Karine - Parc national de la Vanoise

Un début de croissance plus précoce peut toutefois être synonyme d'une exposition plus fréquente aux gels tardifs, qui entravent la croissance et le développement des plantes (Winkler et al., 2018).

Si les plantes semblent répondre rapidement à la fonte précoce du printemps, les animaux n'ont pas forcément les mêmes capacités d'adaptation, ils peuvent ainsi se retrouver désynchronisés avec la flore environnante.

II. Des changements dans l'espace

2 Les règles changent

La présence d'une espèce sur un territoire dépend, entre autres, des conditions climatiques optimales pour son développement. **La période de végétation est un paramètre important qui détermine en partie l'aire de répartition d'une espèce.** Un climat plus chaud allonge la période de végétation et permet à des espèces précédemment limitées par la rigueur des conditions climatiques ou une saison trop courte de coloniser de nouvelles surfaces, **notamment vers les sommets** (Bret, 2016 ; Cremonese et al., 2019 ; Matteodo et al., 2016 ; Vittoz et al., 2013). Ces colonisations peuvent engendrer de nombreuses problématiques, notamment dans le cas d'espèces invasives.



De nouvelles arrivées

C'est par exemple le cas de l'**Orchis à trois dents** (*Neotinea tridentata*), une orchidée que l'on retrouve habituellement en plaine, que l'on peut aujourd'hui observer à Termignon, ou de l'**Orchis bouc** (*Himantoglossum hircinum*) d'ordinaire plus méridional, présent sur Peisey-Nancroix.



Orchis à trois dents

Des remontées altitudinales

Dans de nombreuses régions, **des remontées en altitude des espèces végétales sont observées**. De nombreuses essences forestières sont par exemple remontées d'environ 30 m dans les Alpes au cours du XXe siècle (Lenoir et al., 2008 lu dans Cremonese et al., 2019).



Orchis bouc



Ces remontées vers des altitudes plus élevées peuvent également être influencées par d'autres facteurs, comme par exemple l'abandon du pastoralisme, des changements dans la gestion forestière, une augmentation des dépôts azotés, etc. Ces différents facteurs peuvent s'ajouter ou au contraire avoir des effets antagonistes. Selon les zones étudiées, les facteurs majoritairement responsables de ces changements de distribution ne seront pas forcément les mêmes (Grytnes et al., 2014 ; Matteodo et al., 2016 ; Vittoz et al., 2013).

Des déplacements "horizontaux"

On observe également des déplacements « horizontaux » au sein d'un même étage de végétation. Des espèces d'habitats voisins colonisent petit à petit de nouvelles surfaces (Bret, 2016 ; Cannone & Pignatti, 2014). Ce déplacement est particulièrement marquant pour les communautés des **combes à neige** où de nouvelles espèces, typiques des pelouses alpines avoisinantes, s'installent progressivement tandis que la présence d'espèces typiques des combes à neige se fait plus rare (Matteodo et al., 2016).



Saule herbacé, espèce
typique des combes à neige

Pour l'ensemble des espèces d'altitude, les déplacements et la surface d'habitats disponibles sont limités en raison de la forme conique des montagnes. On s'attend donc à une contraction des aires de répartition. **D'ici la fin du XXIe siècle, les plantes de haute montagne pourraient ainsi perdre de 44 à 50 % de leur aire de répartition actuelle.** Cette contraction des aires de répartition pourrait entraîner des déclinés importants, notamment pour les espèces alpines et les espèces endémiques qui ne se développent que dans de conditions environnementales particulières (Dullinger et al., 2012).



Dans une mesure limitée, la perte d'habitats due au réchauffement climatique peut être compensée par la fonte des glaciers qui libérera de nouveaux espaces qui pourront par la suite être colonisés par les plantes alpines (Inouye, 2020).



3 Changement de la composition floristique

Ce déplacement vers des altitudes plus élevées conduit à une **augmentation du nombre d'espèces** mais également à une **homogénéisation de la composition floristique** (Cannone & Pignatti, 2014). Dans les Alpes suisses, sur 37 sommets étudiés, **une augmentation de la richesse spécifique de 86 %** a été observée au cours du XXe siècle (Steinbauer et al., 2018 ; Vittoz et al., 2013). Cette tendance semble s'être accélérée ces dernières décennies et se généralise à l'ensemble des régions étudiées (Steinbauer et al., 2018).

Néanmoins, le déplacement d'espèces alpines en provenance d'altitudes inférieures vers les sommets est un facteur susceptible d'accroître la compétition pour les ressources et l'habitat. Les espèces de hautes altitudes, adaptées à des conditions environnementales spécifiques, devraient être négativement impactées par l'augmentation des températures car elles ne peuvent se développer que dans une gamme de conditions environnementales plus restreintes, elles sont donc moins compétitives (Bret, 2016 ; Matteodo et al., 2016).

III. Des conclusions difficilement généralisables

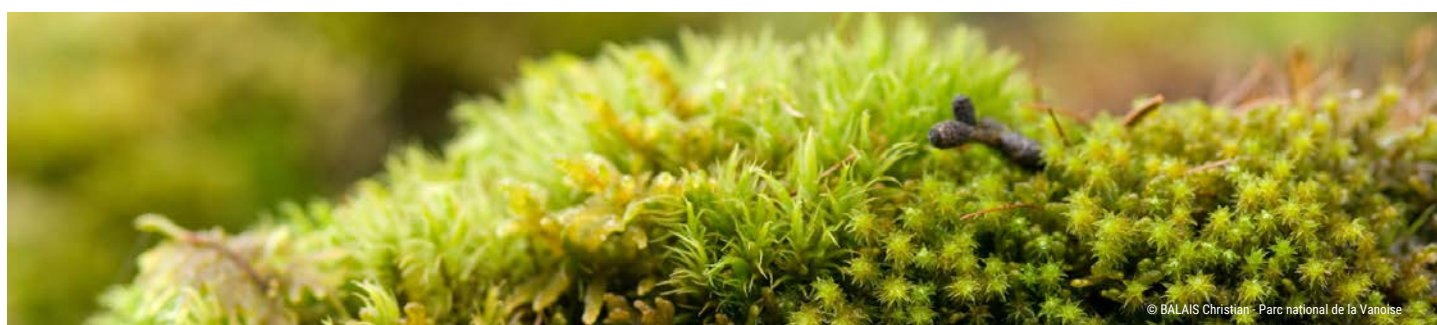
À travers ces quelques exemples, il apparaît que les réponses de la flore des Alpes ne sont pas uniformes. Identifier avec précision ces réponses et leurs liens avec le changement climatique est également un défi, car d'autres facteurs notamment anthropiques façonnent la distribution des espèces végétales. En parallèle, les fortes variations régionales et la diversité de microclimats rendent difficile les généralisations ou conclusions sur l'ensemble des zones alpines. La fonte des glaciers et la remontée de la forêt sont en train de profondément modifier les paysages alpins. Ces mutations sont également susceptibles d'influencer la distribution et l'évolution de la flore alpine.





RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Asse, D., Chuine, I., Vitasse, Y., Yoccoz, N.G., Delpierre, N., Badeau, V., et al. (2018). Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 220–230.
- Bret, C. (2016). Evolution des végétations d'alpages dans un contexte de changement global. Rapport de stage, Université Paul Sabatier – Toulouse, 49 p.
- Cannone, N. & Pignatti, S. (2014). Ecological responses of plant species and communities to climate warming : upward shift or range filling processes? *Climatic Change*, 123, 201–214.
- Cremonese, E., Carlson, B., Filippa, G., Pogliotti, P., Alvarez, I., Fosson JP. et al. (2019). AdaPTMont-Blanc : Rapport climat : Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines. Rédigé dans le cadre du projet AdaPT Mont-Blanc financé par le Programme européen de coopération territoriale Alcotra Italie-France 2014-2020., 101 p.
- Dullinger, S., Gattringer, A., Thuiller, W., Moser, D., Zimmermann, N.E., Guisan, A., et al. (2012). Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature Climate Change*, 2, 619–622.
- Grytnes, J.-A., Kapfer, J., Jurasinski, G., Birks, H.H., Henriksen, H., Klanderud, K., et al. (2014). Identifying the driving factors behind observed elevational range shifts on European mountains. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 876–884.
- Inouye, D.W. (2020). Effects of climate change on alpine plants and their pollinators. *Annals Of The New York Academy Of Sciences*, 1469, 26–37.
- Matteodo, M., Ammann, K., Verrecchia, E.P. & Vittoz, P. (2016). Snowbeds are more affected than other subalpine–alpine plant communities by climate change in the Swiss Alps. *Ecology and Evolution*, 6, 6969–6982.
- Steinbauer, M.J., Grytnes, J.-A., Jurasinski, G., Kulonen, A., Lenoir, J., Pauli, H., et al. (2018). Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature*, 556, 231–234.
- Vittoz, P., Cherix, D., Gonseth, Y., Lubini, V., Maggini, R., Zbinden, N., et al. (2013). Climate change impacts on biodiversity in Switzerland : A review. *Journal for Nature Conservation*, 21, 154–162.
- Winkler, D.E., Butz, R.J., Germino, M.J., Reinhardt, K. & Kueppers, L.M. (2018). Snowmelt Timing Regulates Community Composition, Phenology, and Physiological Performance of Alpine Plants. *Frontiers in Plant Science*, 9.



© BALAIS Christian - Parc national de la Vanoise



© BLANCHERMAIN Joël - Parc national de la Vanoise

Les lacs constituent une **grande majorité de l'eau douce terrestre** à l'état liquide, abritent une importante biodiversité et fournissent un ensemble de **services essentiels** (disponibilité en eau douce, valeurs paysagères, touristiques, etc.) (Becquet, 2018 ; Feret et al., 2017 ; Jacquemin, 2019 ; O'Reilly et al., 2015). Ils abritent des organismes spécialisés vivant dans des conditions environnementales particulières (englacement prolongé et températures froides même en été, eaux pauvres en minéraux et matières organiques, etc.). **Tout changement, même mineur peut profondément impacter leurs caractéristiques et les organismes qui s'y développent** (Becquet, 2018 ; Feret et al., 2017 ; Jacquemin, 2019 ; O'Reilly et al., 2015). Ces milieux sont donc considérés comme des « **sentinelles** » en raison de leur sensibilité et de leur réponse rapide aux changements environnementaux (Feret et al., 2017 ; Jacquemin, 2019).



I. Modifications des conditions environnementales



Quelles
conséquences

1 Les lacs se réchauffent

Suite à l'augmentation des températures moyennes, une étude réalisée à l'échelle mondiale a démontré que la **quasi-totalité des lacs d'altitude se sont réchauffés au cours des dernières décennies** (Khamis et al., 2014 ; O'Reilly et al., 2015).

Des conséquences en cascade :

Face à l'augmentation des températures, la **durée où la glace recouvre les lacs d'altitudes est plus courte**. Les lacs sont ainsi exposés plus tôt et plus longtemps au rayonnement solaire, ce qui accentue le réchauffement estival (Jacquemin, 2019 ; O'Reilly et al., 2015 ; Woolway et al., 2020).

Les premiers résultats du programme **Lacs sentinelles** mettent en évidence une réduction de la période d'englacement, avec une période de **7.5 à 8 mois/an contre 9 à 10 mois** il y a quarante ans (Martinot et al., 2020).

La **productivité des lacs est également favorisée**, ce qui amplifie les processus d'eutrophisation, même si les lacs de montagne sont moins concernés (Keck et al., 2020). On observe ainsi de plus en plus **d'épisodes d'efflorescences causés par des proliférations importantes de phytoplancton** (Jacquemin, 2019).

Ces phénomènes s'accompagnent souvent d'une augmentation de la matière organique, une désoxygénation des eaux profondes, une perte de la valeur paysagère, voire des risques de production de toxines, etc. (Jacquemin, 2019 ; O'Reilly et al., 2015).



© PERRIER Jacques - Parc national de la Vanoise

Lacs du Carro en phase de dégel



Eutrophisation

Phénomène d'enrichissement des eaux en nutriments (phosphates, nitrates, etc.). Ce processus est souvent accéléré voire induit par une pollution des eaux par le rejet d'effluents domestiques ou agricoles chargés en nutriments. Il se caractérise de façon générale par une prolifération du phytoplancton et entraîne une augmentation de la productivité primaire.



La hausse des températures **perturbe également le régime thermique et le fonctionnement des lacs** :

- La couverture de glace fond plus rapidement au printemps et se reconstitue plus tard en automne, il en résulte une **stratification estivale des masses d'eau plus longue** (Becquet, 2018 ; Jacquemin, 2019).
- Ces perturbations vont également **induire des changements dans les processus associés au brassage de l'eau, dépendant du régime thermique** (cycle des nutriments, dégradation de la matière organique, teneur en oxygène, composition biologique etc.) (Jacquemin, 2019).

Ce réchauffement de l'eau peut entraîner une évaporation accrue et ainsi une baisse du niveau du lac en cas d'apport d'eau insuffisant (O'Reilly et al., 2015 ; Woolway et al., 2020).

2 Réduction des apports en eau de fonte

Pour les lacs d'altitude, l'apport d'eau se fait en grande partie via la fonte des glaciers et de la neige ainsi que par des sources avoisinantes. **La typologie des lacs d'altitude repose en grande partie sur le mode d'alimentation principal** (Martinot et al., 2020).

Ainsi la fonte prononcée des glaciers et la fonte précoce de la neige impactent le régime hydrologique de nombreux lacs, **notamment les lacs polaires et les lacs froids**, principalement alimentés par les eaux de fonte (Khamis et al., 2014).

On s'attend par exemple à **une réduction des apports en eau froide et des charges sédimentaires** habituellement transportées par la fonte des glaciers et de la neige.

Les modifications de l'hydrologie dans les bassins versants pourraient également modifier le régime thermique des lacs.



Lac du Grand Méan (lac polaire)



Lac du Mont coua (lac froid)

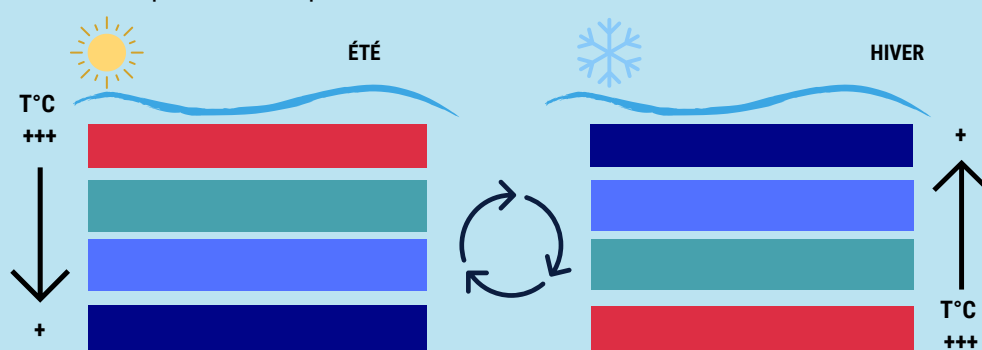
Régime thermique d'un lac



Le régime thermique d'un lac correspond aux changements de températures de l'eau dans le temps et à différentes profondeurs (Becquet, 2018). Avec la profondeur, le réchauffement de l'eau induit par le rayonnement solaire s'atténue.

La densité de l'eau étant liée à sa température (densité maximale à 4°C), une stratification thermique se met ainsi en place en été avec les eaux froides en profondeur et les eaux plus chaudes proches de la surface, et inversement en hiver.

L'homogénéisation des composés et les apports en oxygène se font via les brassages qui sont eux-mêmes dépendants des variations de températures, de l'eau de fonte et de l'inversion saisonnière de la stratification.



En Vanoise

Le **lac de l'Arpont** qui était jusqu'à 2018 de **type glaciaire** (température en dessous de 6 °C en été, en lien avec son alimentation massive en eau de fonte du glacier de l'Arpont tout proche) **vient de connaître un changement radical**.

Ses **eaux sont devenues plus transparentes et la température de surface a évolué au cours de l'été 2019 pour atteindre 12 °C**. Les suivis récents confirment que le lac n'est plus alimenté directement par les eaux de fonte du glacier, ce qui laisse présager une évolution vers des caractéristiques de lac « froid ».



Lac et glacier de l'Arpont (de haut en bas : 1996 - 2004 - 2016)



Lacs blanc (à gauche) et noir du Carro en 2001 et 2019

Il rejoint donc le **lac blanc du Carro** qui a connu cette déconnexion quelques années avant suite à la quasi-disparition du glacier de Derrière-les-lacs et la formation de plusieurs petits lacs dans les moraines supérieures qui jouent un rôle de filtre (bassins de décantation). Le lac a donc perdu sa couleur laiteuse, liée au transport de fines particules dans les eaux de fonte glaciaire, pour un bleu turquoise.

3 Modification du régime des précipitations

L'apport en eau se fait également via les précipitations sous forme de pluie. Toute modification du régime des précipitations pourrait ainsi perturber l'alimentation en eau des lacs. Actuellement, les modèles climatiques ne prédisent **pas de modifications majeures de la pluviométrie générale** (Woolway et al., 2020). En revanche, **une augmentation des phénomènes extrêmes est prévue**, notamment des orages et des tempêtes qui deviendront plus fréquents. Ces changements pourraient aussi **impacter le régime hydrologique et thermique** des lacs (Jacquemin, 2019 ; Woolway et al., 2020).



Torrent au refuge d'Entre le Lac et au Lac de la Plagne, formé après un orage

- Sur le long terme une augmentation des événements de précipitations extrêmes pourrait entraîner une élévation du niveau des lacs, potentiellement des inondations, un apport accru en nutriments et en sédiments, moins de transparence, etc. (Jacquemin, 2019 ; Woolway et al., 2020).
- Les événements extrêmes estivaux peuvent également entraîner une déstratification temporaire du lac et limiter le réchauffement de l'eau via la lumière (en cas de forte turbidité), modifiant ainsi les cycles biogéochimiques internes du lac notamment en limitant l'apport d'oxygène et d'eau plus chaude en profondeur (Perga et al. 2018).

II. Modification du compartiment biologique

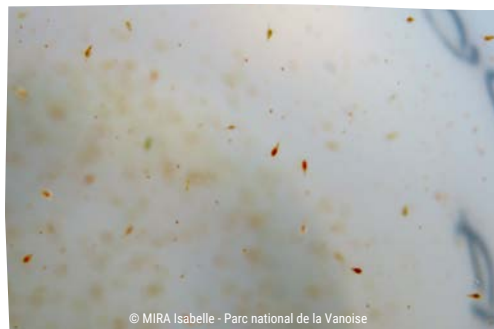
Quelles
conséquences

1 Phénologie

Avec l'augmentation des températures, la couverture de glace fond plus rapidement, ce qui permet par exemple au phytoplancton de se développer plus tôt (Jacquemin, 2019).



Algues à la surface du Lac des Échines



Copépodes (petits crustacés), échantillonnés lors du programme "Lacs sentinelles"

2 Modifications de la composition en espèce

Les effets précédemment cités entraîneront également des changements dans les communautés animales et végétales, **avec notamment une augmentation du phytoplancton** (Birck et al., 2013), **une diminution des organismes liés à des eaux froides et un remplacement par des organismes liés à des eaux plus chaudes** (Khamis et al., 2014).

Au cours des dernières décennies, de nombreux lacs semblent connaître une augmentation significative des organismes photosynthétiques et une diminution des organismes hétérotrophes. Ces changements d'abondance sont probablement dus à des modifications des conditions environnementales qui sélectionnent des espèces ayant des exigences écologiques différentes (Keck et al., 2020).

Lacs sentinelles

Si de plus en plus d'études s'intéressent aux impacts du changement climatique sur les lacs d'altitude, notre connaissance de ces milieux reste encore limitée.

Il existe donc un réel besoin d'amélioration des connaissances pour comprendre le fonctionnement des lacs d'altitude et les facteurs environnementaux qui le contrôlent afin d'anticiper leurs réponses face au changement global. Enjeux auxquels le programme Lacs sentinelles souhaite répondre, en assurant un suivi commun et régulier de plusieurs lacs de l'arc alpin (Becquet, 2018).



réseau lacs
sentinelles

Pour plus de renseignement, consulter le site internet
<http://www.lacs-sentinelles.org/>



© AUGÉ Vincent - Parc national de la Vanoise

Campagne de mesure du programme Lacs sentinelles sur le Lac de l'Arpont.

III. Formation de nouveaux lacs



Quelles
conséquences

1 33 nouveaux-nés

En Savoie, **33 nouveaux lacs aux abords des glaciers se sont créés au cours des 40 dernières années**, majoritairement situés en Haute-Maurienne. Ces « nouveaux-nés » se situent aux abords des glaciers, là où le recul de la glace et les modifications géomorphologiques associées ont creusé des dépressions ou des cuvettes d'accueil pour les eaux de fonte (Martinot et al., 2020). La fonte des glaciers a également contribué à l'extension de nombreux lacs.

Ces nouveaux lacs constituent de nouveaux espaces qui seront potentiellement colonisés par des organismes adaptés. Ces nouveaux écosystèmes pourraient compenser en partie les impacts du changement climatique sur les lacs glaciaires, qui seront de plus en plus perturbés par l'évolution de leurs bassins versants et du climat. Ces nouveaux lacs constituent aussi des zones à risques, en cas de vidange glaciaire (cf. Fiche Glacier).

Quelques exemples

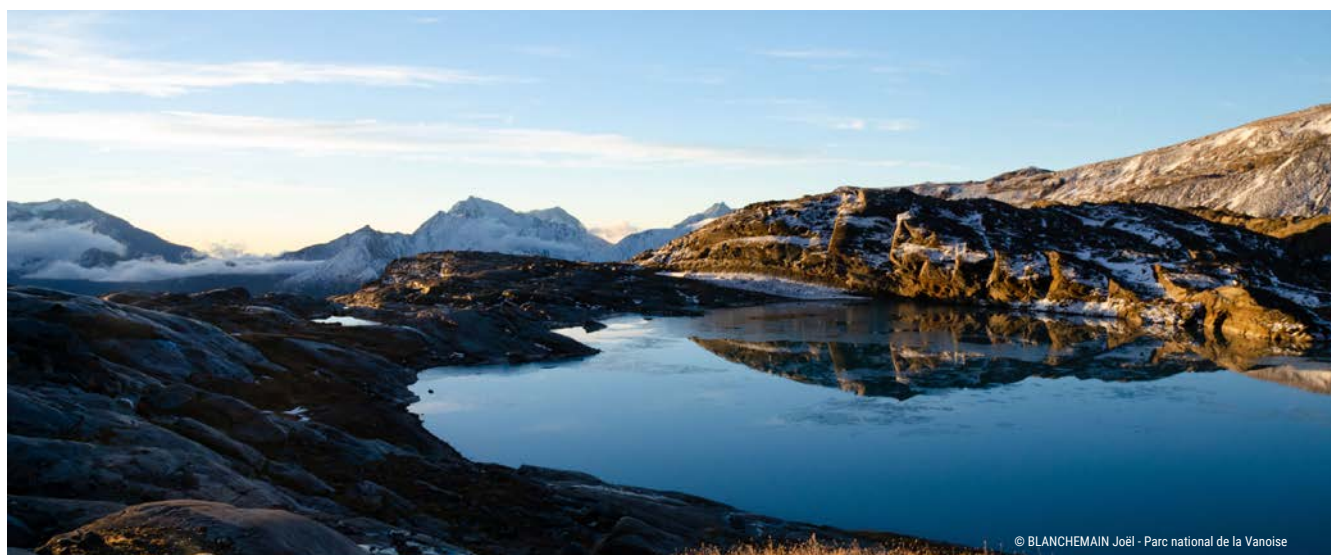
- **Lac du Montet** (Bonneval sur Arc) : ce lac est apparu au début des années 1990 et s'est progressivement étendu suite à la fonte du glacier du Montet, ce dernier a d'ailleurs perdu plus des deux-tiers de sa surface initiale. En 2010, le lac et le glacier se sont complètement déconnectés.
- **Lacs du glacier des Sources inférieures de l'Arc** (Bonneval sur Arc) : le premier lac est apparu entre 1980 et 1990, suivi par un deuxième lac en 2010 et d'un troisième en 2012.



- **Lac du Grand Méan** (Bonneval sur Arc) : apparu dans les années 1980, le lac fait aujourd'hui près de 300 m de longueur et 100 m de large.
- **Lac à proximité du glacier du Pelve** (Val Cenis).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Becquet, J. (2018). *Étude du régime thermique des lacs d'altitude et des facteurs de contrôle dans le cadre du réseau Lacs sentinelles*. Rapport de stage, Université Savoie Mont-blanc, 56 p.
- Birck, C., Epailard, I., Leccia, M. F., Morand, A., Miaud, C., Bertrand, C., et al. (2013). Sentinel lakes : a network for the study and management of mountain lakes in the French Alps and in Corsica. *Journal on Protected Mountain Areas Research and Management*, 5, 63-69.
- Feret, L., Bouchez, A. & Rimet, F. (2017). Benthic diatom communities in high altitude lakes: a large scale study in the French Alps. *International Journal of Limnology*, 53, 411–423.
- Jacquemin, C. (2019). *Vulnérabilité des lacs de haute altitude au changement climatique*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, 222 p.
- Keck, F., Millet, L., Debroas, D., Etienne, D., Galop, D., Rius, D., et al. (2020). Assessing the response of micro-eukaryotic diversity to the Great Acceleration using lake sedimentary DNA. *Nat Commun*, 11, 3831.
- Khamis, K., D.M. Hannah, L.E. Brown, R. Tiberti, & A.M. Milner. (2014). « The Use of Invertebrates as Indicators of Environmental Change in Alpine Rivers and Lakes ». *Science of The Total Environment*, 493, 1242-54.
- Martinot, J.P, Mansoux, H., Béranger, P. (2020). Les lacs de Savoie, du Bourget aux lacs nouveaux-nés., Vizille, 193 p.
- O'Reilly, C. M., Sharma, S., Gray, D. K., Hampton, S. E., Read, J. S., Rowley, R. J., Schneider, P., Linters, J. D., McIntyre, P. B., Kraemer, B. M., et al. (2015), Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 10,773– 10,781.
- Perga, M.-E., Bruel, R., Rodriguez, L., Guénand, Y. & Bouffard, D. (2018). Storm impacts on alpine lakes: Antecedent weather conditions matter more than the event intensity. *Global Change Biology*, 24, 5004–5016.
- Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Linters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M. & Sharma, S. (2020). Global lake responses to climate change. *Nat Rev Earth Environ*, 1, 388–403.





Les forêts couvrent une grande partie des territoires de montagne. Partie intégrante des paysages, elles assurent également un certain nombre de services (production de bois, protection contre les risques naturels, contribution à l'identité paysagère et culturelle, etc.) (Courbaud et al., 2010). Le climat joue un rôle essentiel dans la répartition des espèces forestières, dans leur croissance, leur dynamique. On s'attend donc à des effets marqués du changement climatique sur le devenir des forêts d'altitude (Asse et al., 2018 ; Bertrand, 2012 ; Legay, 2015).



I. Les forêts gagnent du terrain



Quelles
conséquences

1 Remontées altitudinales

De nombreuses études ont enregistré une **remontée en altitude moyenne de 30 m/décennies** pour de nombreuses essences forestières depuis le milieu des années 1980. Soit une **remontée totale de 65 m** (Lenoir & Gegout, 2010). Ces déplacements sont à la fois issus de l'évolution des conditions climatiques, de l'abandon du pastoralisme, des changements de gestion forestière, etc. (Bertrand, 2012 ; GREC-SUD, 2019 ; Labonne et al., 2019 ; Legay, 2015). Ils sont toutefois limités par les capacités de dispersion et de colonisation des espèces, la fragmentation des habitats ou encore les caractéristiques du sol qui permettent ou non leur installation à plus haute altitude (Lenoir & Gegout, 2010).



© AUGÉ Vincent - Parc national de la Vanoise

Colonisation des pelouses subalpines
par le pin cembro



© GOTTI Christophe - Parc national de la Vanoise

L'ampleur de cette remontée diffère selon les espèces ; ainsi pour les ligneux (arbres, arbustes) ce déplacement est limité à 15 m/décennies, en raison de la durée plus longue de leur cycle de vie (Lenoir et Gegout, 2010).



2 Remontées latitudinales

Moins d'études ont répertorié des déplacements au niveau des latitudes, notamment en raison de difficultés logistiques et méthodologiques. Néanmoins un déplacement de **10 km vers les pôles** a été observé dans les forêts américaines (Bertrand, 2012).

Quelles conséquences ?

Modifications des écosystèmes et de leur biodiversité

Ces réorganisations dans l'espace entraînent et entraîneront des changements marqués dans les écosystèmes, en modifiant la présence et l'abondance des essences forestières et des espèces animales et végétales inféodées aux forêts. Cela peut avoir des impacts sur les interactions entre les espèces et sur la diversité des écosystèmes (Bertrand, 2012).

Des déplacements limités

Le changement climatique va s'intensifier et s'accélérer dans les prochaines décennies. Comme expliqué précédemment, les capacités de dispersion des essences forestières sont limitées. Elles ne pourront donc pas suivre les conditions optimales pour leur développement. Leur vitesse de déplacement est limitée à 50 km/siècle alors que les conditions climatiques devraient se déplacer de 500 km/ siècle vers le Nord lors des prochaines décennies (Labonne et al., 2019). On s'attend donc à **une diminution importante des aires de répartitions de nombreuses espèces** (Legay, 2015).

C'est par exemple le cas du **sapin** et de l'**épicéa** dont les aires de répartition **devraient diminuer respectivement de 60% et 90%** à l'échelle de la France (Legay, 2015). Ce constat est amplifié dans les zones de montagnes où la dispersion est limitée par les caractéristiques du relief.

II. Des changements dans le temps

Des saisons chamboulées

Lors des dernières décennies, les stades phénologiques (débourrement*, floraison, jaunissement et perte des feuilles, etc.) de nombreuses espèces se sont décalés. On note ainsi une **avancée des dates de débourrement au printemps** de 2 à 3 jours par décennies et un **retard de la sénescence en automne** d'environ 1 jour. Ces modifications impliquent un **rallongement de la saison de végétation** (Asse et al., 2018 ; GREC-SUD, 2018 ; Lebourgeois et al., 2011 ; Legay, 2015).

*débourrement : sortie des bourgeons au printemps



De nombreuses espèces ont besoin de périodes de grands froids afin de lever la dormance des graines et de démarrer leur germination. **Le début de la croissance des semis est donc influencé par les températures présentes pendant l'hiver et au début du printemps.** Face à l'augmentation des températures en hiver, les essences dont la levée de dormance des graines nécessite des grands froids comme l'épicéa pourraient subir des pertes de régénération importantes (GREC-SUD, 2018).

Phénoclim, quels résultats ?

- En 2020, les résultats du programme de sciences participatives PhénoClim ont démontré une avancée des dates de débourrement de **6 et 10 jours** en moyenne, à basse et haute altitude dans les Alpes françaises.
- En 2019, pour les événements d'automne, une **avancée de 1 jour** a été observée à basse altitude (en dessous de 1400m) tandis qu'un **retard de 4 jours** a été observé pour les plus hautes altitudes (au-dessus de 1400m).



Fleurs femelles de noisetier



Feuillage d'automne du peuplier tremble

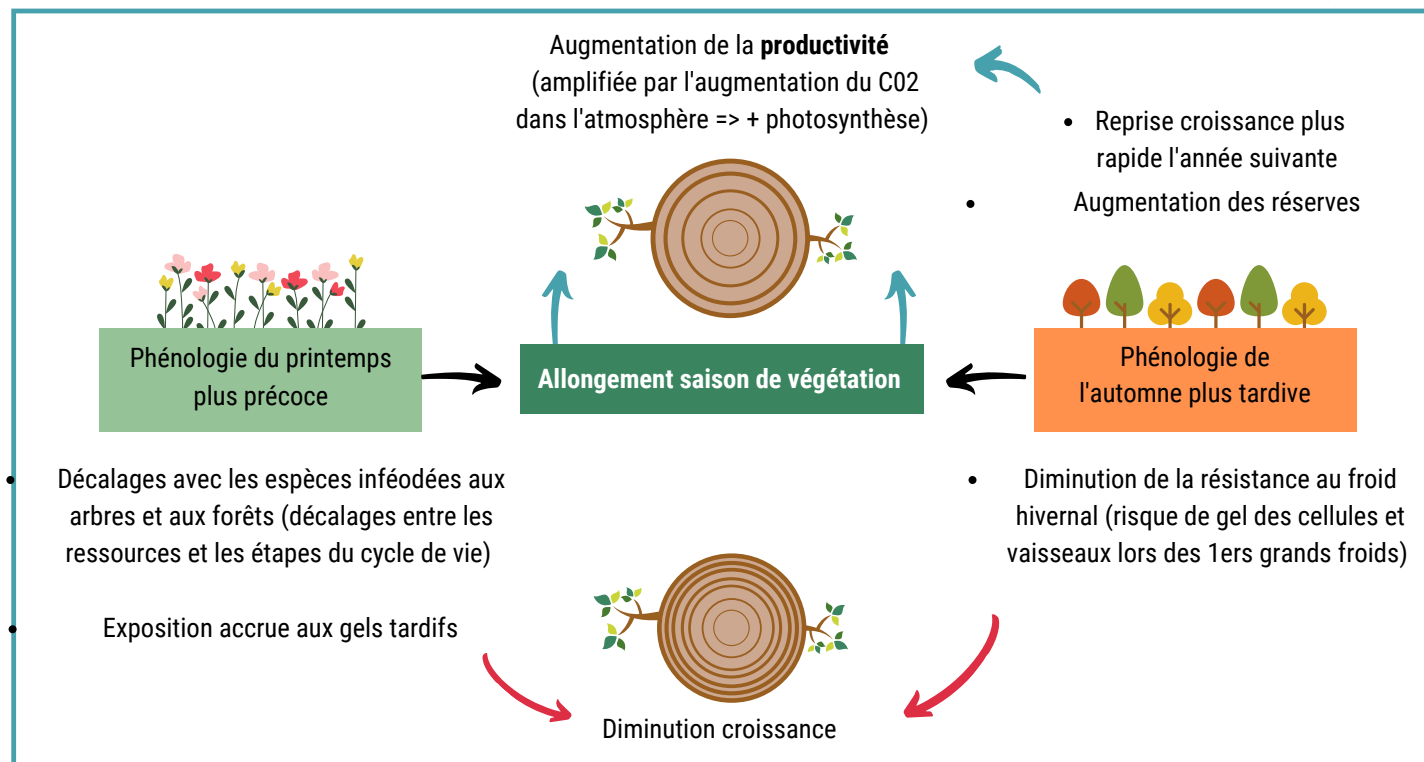


Jeunes pousses de mélèze au printemps



Saule en fleurs (chatons mâles)

Quelles conséquences ?



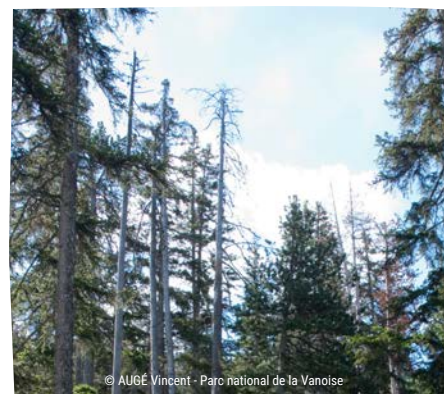
Impacts des modifications phénologiques (D'après Lebourgeois et al., 2011).

III. Augmentation des contraintes

Quelles
conséquences

1 Stress hydrique

Des températures plus élevées ainsi qu'une période de végétation plus longue **impliquent une évapotranspiration accrue et une consommation d'eau plus importante**. Couplées à une diminution de l'eau dans les sols et à des épisodes de sécheresses plus intenses et plus fréquents, **cela peut entraîner un stress hydrique important et une augmentation de la mortalité des essences forestières**. C'est le cas en méditerranée pour le **hêtre**, le **pin sylvestre** et le **sapin** qui connaissent actuellement des baisses de croissance et des dépérissements importants (Legay, 2015).



Des pins à crochets en dépérissement

Les espèces de conifères comme le sapin pectiné, l'épicéa commun ou le pin sylvestre sont particulièrement sensibles à ces phénomènes (Bertrand, 2012 ; Labonne et al., 2019). Ces essences pourraient être progressivement remplacées par des forêts dominées par des feuillus comme le hêtre, plus résistant à la sécheresse (Labonne et al., 2019).

Les forts épisodes de sécheresse entraînent également des pertes précoces du feuillage au cours de l'été, notamment chez les bouleaux, les charmes, les peupliers et les hêtres (Alcius, 2015 ; Landmann et al., 2003).

2 Augmentation des parasites et des pathogènes

Des températures plus clémentes vont également **favoriser le multivoltinisme** (capacité à produire plusieurs générations par an), **la croissance et l'expansion des pathogènes et parasites** des essences forestières (GREC-SUD, 2019 ; Labonne et al., 2019 ; Lebourgeois et al., 2011 ; Legay, 2015).

Ce constat est d'autant plus alarmant sachant que les arbres seront progressivement fragilisés par le stress hydrique lié aux sécheresses récurrentes et intenses, ils seront ainsi moins résistants aux attaques.

Ces dernières années, on observe ainsi une progression des chenilles processionnaires du pin vers le Nord et en altitude (GREC-SUD, 2019 ; Labonne et al., 2019 ; Lebourgeois et al., 2011 ; Legay, 2015).

Le stress hydrique rend les épicéas particulièrement vulnérables aux attaques de scolytes, attaques qui sont à l'origine de nombreux dégâts ces dernières années dans les zones de moyenne et haute montagne (Labonne et al., 2019).

De même, le dépérissement du pin causé par le pathogène *Diplodia pineae* est également accentué par la sécheresse (Legay, 2015).



Traces de scolytes sur un tronc d'épicéa

Liste (non exhaustive) des ravageurs et maladies possiblement favorisés par le changement climatique (Legay, 2015)

Parasites et pathologies	Essences particulièrement touchées
Scolytes dont typographes	Epicéas 
Phalène brumeuse	Chênes, hêtres, érables, frênes   
Tordeuse grise du mélèze	Mélèzes 
Processionnaire du pin	Pinus sp.   

IV. La gestion forestière de demain

Face à ces différents impacts, les gestionnaires des forêts adaptent leurs pratiques. L'objectif est de proposer un panel de solutions, en espérant ainsi favoriser la résistance et la résilience des peuplements (Legay & Ladier, 2008).

Quelques exemples

- Une de ces solutions consiste à favoriser le mélange d'espèces et l'introduction de nouvelles essences au sein des peuplements forestiers.
L'introduction de nouvelles essences est mis en œuvre sur de petites surfaces, dans des dispositifs suivis par le département "Recherche Développement et Innovation" de l'ONF (**les îlots d'avenir**).
- Il est également possible de réaliser des migrations assistées, vers le Nord ou en altitude, d'essences autochtones de provenances plus méditerranéennes, qui ont pu développer une meilleure résistance à la sécheresse. C'est ce qui est fait par exemple avec différentes provenances méridionales de Sapin pectiné, plantées dans le Nord-Est ou dans les Alpes.



Sapin pectiné



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Alcius, S. (2015). *Réponse de la photosynthèse du hêtre (Fagus sylvatica) à la sécheresse et à la défoliation*. Rapport de stage, Université de Lorraine, 28p.

Asse, D., Chuine, I., Vitasse, Y., Yoccoz, N.G., Delpierre, N., Badeau, V., et al. (2018). Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 220–230.

Bertrand, R. (2012). *Réponse spatio-temporelle de la végétation forestière au réchauffement climatique - Évaluation du remaniement de la végétation et caractérisation de l'effet des facteurs écologiques et géographiques le modulant à l'échelle de l'espèce et des communautés*. Thèse de doctorat, AgroParisTech, 316 p.

Courbaud, B., Kunstler, G., Morin, X., & Cordonnier, T. (2010). Quel futur pour les services écosystémiques de la forêt alpine dans un contexte de changement climatique ? *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, (98-4).

GREC-SUD. (2018). *Cahier thématique du groupe de travail « montagne » : Impacts du changement climatique et transition(s) dans les Alpes du Sud*. GREC-SUD, Marseille, 48 p.

Labonne, S., Cordonnier, T., Kunstler, G. & Fuhr, M. (2019). Forêts de montagne et changement climatique: impacts et adaptations. *Sciences Eaux & Territoires*, 28, 38.

Landmann, G. Breda, N. Houllier, F. Dreyer, E., Flot, J., L. (2003). Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? *Revue Forestière Française*, 55(4), 299-308.

Lebourgeois, F., Rathgeber, C.B.K. & Ulrich, E. (2010). Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science*, 21, 364–376.

Lebourgeois, François & Pierrat, J.C & Perez, V. & Cecchini, S. & Ulrich, E. (2011). Rallongement de la saison de végétation des hêtraies et des chênaies françaises dans les prochaines décennies. Conséquences possibles sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. *Rendez-Vous-Techniques*. 33-34. 72.

Legay, M. (2015). Effets attendus du changement climatique sur l'arbre et la forêt. L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au parlement. *La Documentation française*, 33-64.

Lenoir, J. & Gégout, J., C. (2010). La remontée de la distribution altitudinale des espèces végétales forestières tempérées en lien avec le réchauffement climatique récent. *Revue forestière française*, 3-4 : 465-476.





© AUGÉ Vincent - Parc national de la Vanoise

La majorité des études s'intéressant à l'effet du changement climatique sur la végétation des Alpes s'articulent principalement à la flore des hauts sommets. Peu de recherches portent sur l'évolution des végétations des pelouses alpines et subalpines (Rosbakh et al., 2014). Pourtant le changement climatique soulève de nombreuses problématiques sur ces espaces, notamment au niveau des alpages qui représentent une composante majeure de l'activité pastorale. Les enjeux autour de ces milieux sont donc environnementaux, sociaux et économiques (Bret, 2016).

Les pelouses d'altitude sont ainsi soumises à deux types de pressions, le changement climatique et le pastoralisme, ce qui rend parfois difficile la distinction entre les impacts du changement climatique et ceux liés aux activités agricoles.



I. Effets sur la végétation



Quelles
conséquences

1 Changement des conditions écologiques

En montagne la température et les courtes saisons de croissance sont les deux paramètres qui limitent le développement des espèces végétales. L'augmentation des températures et la fonte précoce du manteau neigeux modifient les conditions dans lesquelles les espèces des pelouses évoluent et se développent en entraînant par exemple un allongement de la saison de végétation (Carbognani et al., 2014 ; Carlson et al., 2017 ; Inouye, 2020 ; Rosbakh et al., 2014).

Des conséquences en cascade :

Remontées altitudinales

La présence d'une espèce sur un territoire dépend, entre autres, des conditions climatiques optimales pour son développement. Des températures plus chaudes, couplées à un allongement de la période de végétation, permettent à des espèces de coloniser de nouvelles surfaces, notamment vers les sommets (cf. Fiche Flore des Alpes). **Cette remontée est par exemple de 30 m pour les plantes forestières** (Bret, 2016 ; Cremonese et al., 2019 ; Matteodo et al., 2016 ; Vittoz et al., 2013).

Changement de composition floristique

Si aucun changement de composition floristique **significatif** ne se dégage actuellement, l'évolution actuelle des conditions écologiques tend à favoriser les espèces ayant des traits avantageux sous des conditions plus chaudes (surface foliaire plus importante, plus grande taille, des graines plus lourdes, croissance lente, reproduction principalement sexuée) (Kudernatsch et al., 2005 ; Rosbakh et al., 2014).



© BALAIS Christian - Parc national de la Vanoise



© HERRMANN Mylène - Parc national de la Vanoise

2 Changement de types de végétations

Avec la remontée des étages de végétation, les espèces des altitudes inférieures vont progressivement rentrer en compétition avec les espèces des pelouses (Inouye, 2020). Si ces changements sont pressentis, **aucune tendance significative ne se dégage encore**. Les pelouses semblent pour l'instant « résister » à l'arrivée des nouvelles venues. La forte densité végétale présente dans les pelouses entraîne en effet une compétition importante pour les ressources, ce qui limite l'établissement de nouvelles espèces (Matteodo et al., 2016).

Les combes à neige*, milieux fragiles

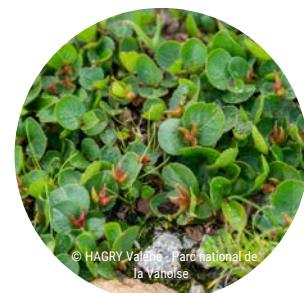
Les changements de composition les plus marqués concernent les combes à neige où de nouvelles espèces en provenance des pelouses avoisinantes s'installent progressivement comme par exemple l'avoine bigarrée. On observe également une augmentation des espèces auparavant minoritaires dans les combes à neige (Matteodo et al., 2016).

Les communautés végétales des combes à neige **évoluent ainsi vers une végétation des pelouses, adaptées à des conditions plus sèches et à une couverture neigeuse plus courte**. À terme, une **réduction voire une disparition des espèces typiques des combes à neige est possible** (Carbognani et al., 2014 ; Matteodo et al., 2016). La formation éventuelle de milieux propices à l'installation des espèces des combes à neige à plus haute altitude pourrait compenser la régression de ces milieux (si les capacités de colonisation des espèces le permettent).

**Milieu où la couche de neige fond tardivement, avec un sol et un microclimat très sélectifs favorisant une végétation particulière. Les plantes des combes à neige sont donc très sensibles à l'évolution de la durée de l'enneigement et à l'augmentation des températures.*



© DELARAYE Thierry - Parc national de la Vanoise



© HAGRY Valérie - Parc national de la Vanoise

Le saule herbacé, une espèce typique des combes à neige

3 Colonisation de nouveaux espaces

Suite aux récentes évolutions de conditions environnementales, on observe également **un phénomène de verdissement** des hautes altitudes, avec une **accélération de la colonisation des espèces des pelouses avoisinantes vers les éboulis et les moraines**, milieux auparavant peu végétalisés. Le recul des glaciers libère aussi de nouveaux espaces qui pourront par la suite être colonisés par des espèces pionnières puis par la végétation des pelouses voisines. Une augmentation progressive de la surface des pelouses est donc possible à mesure que la colonisation végétale s'accroît (Carlson et al., 2017).

Le Parc se mobilise

- Les combes à neige font l'objet d'un suivi régulier mis en place par le Conservatoire Botanique National Alpin (CBNA) et les agents du Parc. Ce suivi permet d'étudier sur le long terme la réponse de ces milieux aux changements globaux.
- Le programme **ROC VEG**, également piloté par le CBNA, vise à étudier les adaptations des plantes des habitats rocheux alpins face aux changements globaux et notamment à documenter les dynamiques de colonisation végétale à l'œuvre dans ces milieux.

II. Effets sur la ressource pastorale

Quelles
conséquences

1 Phénologie

Suite à l'augmentation des températures et à la fonte précoce du manteau neigeux, la croissance de la végétation démarre plus tôt et la période de végétation est plus longue.

Atténuation des différences altitudinales

En montagne, la croissance des plantes démarre à des dates différentes selon l'altitude. Sachant que la qualité des ressources est maximale peu de temps après la pousse, un gradient altitudinal de qualité fourragère se crée. Un déneigement précoce de la neige limite ces différences ce qui diminue la possibilité pour les troupeaux de suivre la nourriture de bonne qualité par migration altitudinale (Toïgo et al., 2016).

Augmentation de la productivité



Transhumance des brebis
vers le Col du Barbier

Suite à l'augmentation des températures et à la fonte précoce du manteau neigeux, un allongement de la période de croissance de la végétation est prévisible. On observe déjà une **augmentation de la productivité et ainsi à une augmentation des ressources disponibles** (cf. verdissement des Alpes, Carlson et al, 2017). Néanmoins, un démarrage plus précoce de la végétation implique des adaptations des pratiques agricoles, avec notamment une avancée de la période d'estive pour que les troupeaux s'alimentent au moment où la végétation est à son pic de qualité fourragère (Chaix et al., 2017). Potentiellement, ces adaptations pourraient entraîner des pressions accrues sur des milieux jusqu'alors préservés, notamment en cas de remontées des troupeaux vers de plus hautes altitudes.

2 Aléas climatiques

Lors des prochaines décennies, les scénarios climatiques prévoient des aléas climatiques plus intenses et plus fréquents, notamment des gels tardifs et des sécheresses estivales de plus en plus prononcées. Face à la diminution de la période d'enneigement, la végétation est moins protégée contre les épisodes de froid. Les périodes de sécheresse limitent également la disponible en eau dans les sols, entraînent une évapotranspiration accrue et favorisent la sénescence des végétaux. Selon les années, ces événements climatiques pourront grandement **impacter la qualité et la quantité des ressources** (Chaix et al., 2017 ; Inouye, 2020).



Pelouse alpine grillée fin juillet après l'épisode
de sécheresse et de canicule de 2015



D'après une étude réalisée en Suisse, le risque d'exposition aux gels tardifs n'a pas évolué depuis 1970 (Klein et al., 2018).



Alpages Sentinelles, le bilan en 2019

L'année 2019 a été marquée par une faible production en herbe, une sénescence rapide de la végétation et une absence de repousse. Ces différents constats sont les conséquences directes d'un printemps et d'un été chauds, accompagnés de période de canicules intenses qui ont fortement impacté la production fourragère.



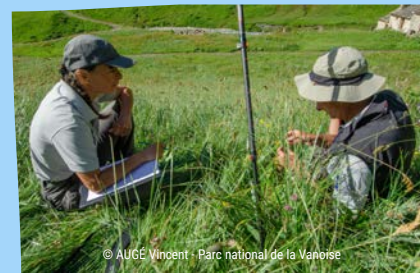
Alpages sentinelles

Alpages sentinelles est un dispositif qui souhaite mettre en place un espace de dialogue entre plusieurs acteurs (chercheurs, gestionnaires d'espaces naturels, acteurs du monde agricole) autour d'une question commune : **le changement climatique et son impact en alpage**. L'objectif de ce programme, basé sur l'interdisciplinarité, est d'observer et de comprendre les effets du changement climatique et de partager les expériences visant l'adaptation des pratiques.

D'ici **2021**, une brochure récapitulant les différents impacts du changement climatique sur la végétation des alpages sera réalisée. Elle permettra de synthétiser l'état des connaissances actuelles et d'apporter des éléments complémentaires à la présente fiche (encore un peu de patience !).

Pour plus de renseignements, consulter le site internet :

<https://www.alpages-sentinelles.fr/>



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Augé, V. (n.d). Les phénomènes naturels ou anthropiques impactant l'état de conservation des pelouses d'altitude. Parc national de la Vanoise, 9 p.
- Bret, C. (2016). *Évolution des végétations d'alpages dans un contexte de changement global. Sciences de l'environnement*. Rapport de stage Université Paul Sabatier – Toulouse, 49p.
- Carbognani, M., Tomaselli, M. & Petraglia, A. (2014). Current vegetation changes in an alpine late snowbed community in the south-eastern Alps (N-Italy). *Alp Botany*, 124, 105–113.
- Carlson, B.Z., Corona, M.C., Dentant, C., Bonet, R., Thuiller, W. & Choler, P. (2017). Observed long-term greening of alpine vegetation—a case study in the French Alps. *Environ. Res. Lett.*, 12, 114006.
- Chaix, C., Dodier, H., Nettiér, B. (2017). Comprendre le changement climatique en alpage, IRSTEA, Grenoble, Asadac MDP, Chambéry, 28 p.
- Inouye, D.W. (2020). Effects of climate change on alpine plants and their pollinators. *Annals Of The New York Academy Of Sciences*, 1469, 26–37.
- Kudernatsch, T., Beck, S., Krenzer, M., Fischer, A., Franz, H., Vogel, M., et al. (2005). 10 Recent Changes in Species Composition and Species Richness of Alpine Grasslands in Berchtesgaden Biosphere Reserve and National Park. *Projecting global change impacts and sustainable land use and natural resources management in mountain biosphere reserves*, 103.
- Matteodo, M., Ammann, K., Verrecchia, E.P. & Vittoz, P. (2016). Snowbeds are more affected than other subalpine–alpine plant communities by climate change in the Swiss Alps. *Ecology and Evolution*, 6, 6969–6982.
- Rosbakh, S., Bernhardt-Römermann, M. & Poschlod, P. (2014). Elevation matters: contrasting effects of climate change on the vegetation development at different elevations in the Bavarian Alps. *Alp Botany*, 124, 143–154.



Les glaciers constituent un des **éléments majeurs** du paysage alpin. À l'échelle mondiale, ils représentent environ 10% des terres émergées (Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019).

Leur sensibilité au changement climatique en font des **indicateurs naturels de l'évolution du climat et de ses impacts** (Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019 ; Gardent, 2014 ; GREC-SUD, 2018, Six & Vincent, 2018 ; Six et al., 2019). Sauf exceptions, ils sont tous en phase de recul et la plupart sont amenés à disparaître avec le réchauffement global de la planète (Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019 ; GREC-SUD, 2018).



Dans les Alpes, cette phase de régression s'est généralisée depuis la fin du Petit Âge Glaciaire en 1850 (Gardent, 2014). Le recul des glaciers est de plus en plus marqué et les récents records de fonte peuvent être attribués à la fois aux extrêmes climatiques et aux tendances à long terme du réchauffement (Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019 ; Thibert et al., 2018).

I. Reculs marqués et bilans de masse en baisse



Quelles
conséquences

1 Perte de surface et de volume

Les glaciers alpins ont perdu **30 à 40 %** de leur surface et la **moitié** de leur volume depuis 1850. Une perte supplémentaire de 10 à 20 % du volume restant a eu lieu depuis 1980 (Gardent, 2014).

Cette perte de surface est plus accentuée dans les Alpes du sud (**-32 % dans les Écrins** par rapport à seulement **-10 % dans le massif du Mont-Blanc**) (Cremonese et al., 2019).

2 Remontée de la ligne d'équilibre glaciaire

Entre 1984 et 2010, la **ligne d'équilibre glaciaire** (LEG), limite entre la zone d'accumulation et la zone d'ablation, est remontée de **170 m** en altitude pour 43 glaciers des Alpes françaises (Einhorn et al., 2015).

La modification du volume d'un glacier dépend de l'**accumulation** de neige dans sa partie supérieure et de l'**ablation** (perte) dans sa partie basse, principalement par fusion. La différence entre l'accumulation et l'ablation, sur une année, constitue le **bilan de masse annuel**. Ce bilan dépend donc directement des conditions météorologiques présentes tout au long de l'année (Gardent, 2014 ; Six & Vincent, 2018).

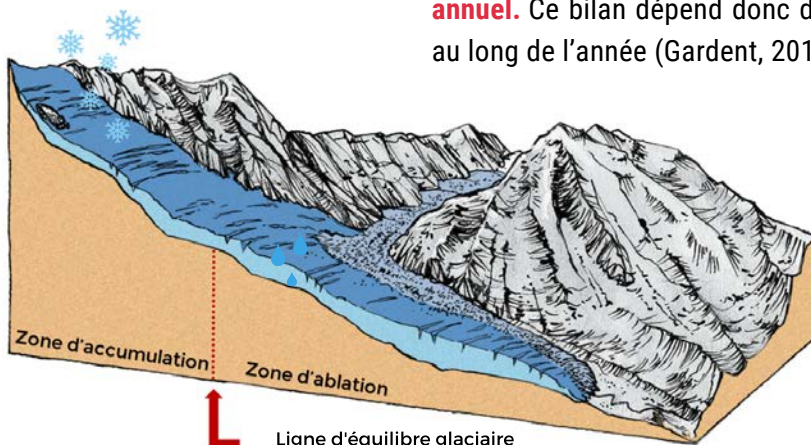


Schéma général d'un glacier

Ces conditions sont justement en train de changer, avec une diminution du manteau neigeux constatée dans tout l'hémisphère Nord (durée et épaisseur) et une hausse globale des températures, accélérant la fonte dans la zone d'ablation (GREC-SUD, 2018 ; Gardent, 2014 ; Six & Vincent, 2018 ; Six et al., 2019 ; Vincent, 2010 ; Thibert et al., 2018).

Le bilan de masse : indicateur des variations climatiques



C'est un **signal direct** et non retardé des conditions climatiques locales au cours d'une année. L'avancée ou le retrait des glaciers sont des signaux indirects, différés et filtrés, des modifications climatiques. Le bilan de masse permet d'**évaluer les variations d'épaisseur moyenne** (Gardent, 2014).

3 Des bilans de masse négatifs

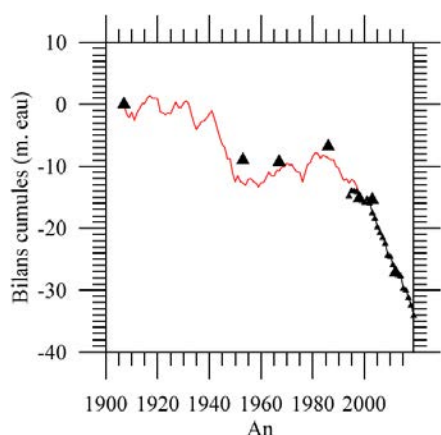
Les mesures de bilan de masse effectuées sur plusieurs glaciers alpins montrent des **bilans négatifs depuis l'année 2003**. Le constat est le même pour l'ensemble des Alpes européennes (GREC-SUD, 2018). C'est notamment l'ablation estivale qui est à l'origine de ces déclin (Vincent, 2010).

Le glacier de Gébroulaz en Vanoise

Le **glacier de Gébroulaz** s'étend sur près de 4 km de long et couvre une surface de 3 km². Il fait l'objet de suivis depuis plus de 100 ans, réalisés successivement par le Service Géographique des Armées, puis les Eaux et Forêts jusqu'en 1966 (Vincent, 2010).

Ce suivi est actuellement réalisé par l'**Institut de Géosciences de l'Environnement** (IGE) de Grenoble. Les derniers résultats des campagnes de suivi soulignent les résultats suivants (Six & Vincent, 2018 ; Six et al., 2019) :

Des **bilans de masse négatifs** avec en moyenne **- 0.77 m d'eau/an** depuis 1995. L'année 2019 est la **troisième année la plus déficitaire** sur la période 1995-2019.



Bilans de masse cumulés du glacier de Gébroulaz depuis le début du 20e siècle (Six et al., 2019).

Entre 2016 et 2018, le front du glacier a reculé en moyenne de **18 m/an**. Depuis 1983, il s'est retranché de **229 m**. Néanmoins, les chercheurs de l'IGE estiment que c'est un recul modéré par rapport à d'autres glaciers.



II. Des conséquences en cascade

Quelles conséquences

Plusieurs études estiment que les glaciers dont la zone d'accumulation se situe en **dessous de 3 500 m** d'altitude **disparaîtront avant la fin du siècle** (Vincent et al., 2019). De même, dans les Alpes Suisses, les glaciologues estiment que **90 % des glaciers auront disparu d'ici 2090** (Cremonese et al., 2019). Ces constats sont alarmants car la fonte des glaciers entraîne de nombreuses conséquences.

1 Approvisionnement en eau

Si, dans un premier temps, la fonte des glaciers amènera une hausse des débits estivaux, rapidement ces derniers baisseront jusqu'à la stabilisation ou la disparition du glacier. À terme, le régime des cours d'eau va passer d'un **régime glaciaire**, marqué par de forts débits estivaux, à un **régime pluvial** avec des débits moindres, +/- sévères en été selon les précipitations estivales (Terrier et al., 2015). De nombreuses activités en montagne dépendent en grande partie des eaux de fonte, comme l'agriculture, notamment pour la ressource en herbe ou l'abreuvement des troupeaux ou encore la production d'électricité (Hock et al., 2019).



© Christophe GOTTI - Parc national de la Vanoise

2 Biodiversité menacée



Renoncule des glaciers

La fonte des glaciers rendra disponible de nouveaux milieux, dont les conditions abiotiques seront moins contraignantes. Les espèces dont la capacité de dispersion et de colonisation le permet pourront s'installer dans ces nouveaux espaces rendus libres par le recul de la glace. **La libération de surfaces en altitude permettra peut-être aux espèces inféodées à l'étage alpin de coloniser ces milieux et ainsi de compenser leur disparition probable à plus basse altitude.** Au contraire, les espèces spécialistes, adaptées aux conditions extrêmes des abords des glaciers vont être amenées à disparaître (Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019).

3 Aléas d'origine glaciaire

Dans les Alpes, un **certain nombre d'aléas sont associés aux surfaces glaciaires**. Étant donné la présence d'activités humaines, ces aléas deviennent des risques. Les plus étudiés et les plus courants sont les **chutes de séracs**, les **vidanges de lacs glaciaires** et les **laves torrentielles** qu'elles engendrent. Face à l'évolution climatique, certains de ces aléas risquent d'être atténués ou au contraire amplifiés (Gardent, 2014). Leur accélération a conduit au montage de plusieurs groupements ou projets comme le PARN, qui regroupe différents acteurs du territoire autour de l'étude des risques naturels dans les Alpes.

En Vanoise

- **En 2015**, une forte crue a eu lieu dans le ruisseau du Niolet près du **refuge de Prarion**.

Plusieurs hypothèses ont été émises sur l'origine de cette crue soudaine. Un éboulement en amont du lac de la Galise, issu de la fonte glaciaire, aurait engendré une vague dans le lac et entraîné un débordement de ce dernier. Cet éboulement aurait aussi pu causer la vidange du lac par érosion. La fonte accélérée du glacier et la rupture d'une poche d'eau ont aussi été proposées comme causes de cette crue.

En Vanoise (suite)

- Un autre épisode de vidange glaciaire a été observé dans la Réserve naturelle de la Grande Sassière, durant l'été 2020. Cet aléa fera prochainement l'objet d'une expertise.



Torrent issu du glacier de Rhêmes-Golette, après la vidange partielle du lac glaciaire

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Cauvy-Fraunié, S. & Dangles, O. (2019). A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 1675–1685.

Cremonese, E., Carlson, B., Filippa, G., Pogliotti, P., Alvarez, I., Fosson JP. et al. (2019). AdaPTMont-Blanc : Rapport climat : Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines. Rédigé dans le cadre du projet AdaPT Mont-Blanc financé par le Programme européen de coopération territoriale Alcotra Italie-France 2014-2020., 101 p.

Einhorn, B., Eckert, N., Chaix, C., Ravanel, L., Deline, P., Gardent, M., et al. (2015). Changements climatiques et risques naturels dans les Alpes : Impacts observés et potentiels sur les systèmes physiques et socio-économiques. *J. Alp. Res*, 103-2.

Gardent, M. (2014). *Inventaire et retrait des glaciers dans les Alpes françaises depuis la fin du Petit Age Glaciaire*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 455 p.

GREC-SUD. (2018). Cahier thématique du groupe de travail « montagne » : Impacts du changement climatique et transition(s) dans les Alpes du Sud. GREC-SUD, Marseille, 48 p.

Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. et al. (2019). High Mountain Areas. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, (Ed(s) Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E. et al). In Press, pp. 131-202.

Six, D. & Vincent, C. (2018). Glacier de Gébroulaz - 2018 - Rapport annuel pour le parc de la Vanoise. Institut des Géosciences de l'Environnement, Grenoble, 35 p.

Six, D., Vincent, C. Laarman, O. (2019). Glacier de Gébroulaz - 2019 - Rapport annuel pour le parc de la Vanoise. Institut des Géosciences de l'Environnement, Grenoble, 36 p.

Thibert, E., Sielenou, P.D., Vionnet, V., Eckert, N. & Vincent, C. (2018). Causes of Glacier Melt Extremes in the Alps Since 1949. *Geophysical Research Letters*, 45, 817–825.

Vincent, C. (2010). *L'impact des changements climatiques sur les glaciers alpins*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 212 p.

Vincent, C., Peyaud, V., Laarman, O., Six, D., Gilbert, A., Gillet-Chaulet, F. & Jourdain, B. (2019). Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du XXI^e siècle : Argentièrre et Mer de Glace. *La Météorologie*, 106.



Le changement climatique est considéré comme une des menaces principales pour la santé humaine et animale (Duvallet, 2015 ; Hofmeister et al., 2010 ; Martin et al., 2010). L'importance de l'activité pastorale sur le territoire (30 % des surfaces du Parc fréquentées par des troupeaux domestiques) induit des interactions avec la faune sauvage et des risques de transmission croisée de pathologies. Le Parc national de la Vanoise constitue ainsi un laboratoire privilégié.



Changement climatique et maladies vectorielles



Quelles
conséquences

Les maladies à transmission vectorielle sont des maladies dont la transmission de l'agent pathogène (virus, bactéries, protozoaires, etc.) se fait par le biais d'une **piqûre d'un arthropode hématophage (vecteur)** lors d'un repas de sang. Ces maladies mettent en jeu un système complexe d'interactions entre hôtes, vecteurs et pathogènes (Duvallet, 2015).

1

Changements des aires de répartition

Les variables climatiques agissent comme un filtre permettant aux espèces de s'installer ou non dans un environnement (Gallana et al., 2013). Suite à l'augmentation des températures, de nouvelles zones deviennent potentiellement favorables pour la survie, le développement, la reproduction des vecteurs, des pathogènes et des hôtes. On observe donc des expansions et des déplacements des aires de répartition de nombreux vecteurs et de leurs pathogènes associés (Duvallet, 2015 ; Gallana et al., 2013 ; Hofmeister et al., 2010).

Certaines maladies sont ainsi observées dans des zones où jusqu'à présent elles étaient absentes. De même, des maladies considérées auparavant comme exotiques se retrouvent actuellement en Europe (Gallana et al., 2013 ; Maclachlan & Mayo, 2013 ; Medlock et al., 2013).

La fièvre catarrhale ovine (FCO), des remontées vers le Nord

L'infection par le virus de la fièvre catarrhale ovine se fait via les moustiques du genre *Culicoides*. La distribution mondiale de cette maladie a récemment connu des changements, notamment en Europe où, avant 1999, seule une incursion limitée avait été observée. L'émergence de la fièvre catarrhale dans de nouvelles zones serait due au récent déplacement vers le nord de son vecteur, favorisé par le changement climatique (Gallana et al., 2013 ; Maclachlan & Mayo, 2013). Avant les années 2000, la FCO était considérée comme une maladie exotique en Europe (Mercier et al., 2018).



© STORCK Frantz - Parc national de la Vanoise

En 2018, plusieurs cas de FCO ont été détectés en France, dont **68 en Haute-Savoie**. L'introduction de la maladie aurait été favorisée par des mouvements d'animaux en provenance de Corse. L'expansion de cette maladie est donc **également favorisée par des facteurs anthropiques**, ici la **transhumance**, pratique pastorale très marquée en Vanoise.



L'expansion de cette maladie présente de nombreux risques car il s'agit d'une maladie commune à la faune sauvage et domestique et pouvant entraîner des conséquences diverses, légères ou graves (perte d'appétit, infécondité, perte de production, avortements, etc.). Des transmissions peuvent donc avoir lieu depuis les animaux d'élevage vers la faune sauvage. Inversement, dans certaines zones, la maladie pourrait se maintenir dans des populations sauvages (Martin et al., 2011). La forte densité de cerfs élaphe dans certaines régions européennes pourrait par exemple jouer un rôle potentiel dans le maintien ou la propagation de cette maladie (Falconi et al., 2011).

Les tiques montent en altitude

Ces dernières années **des remontées en altitude des tiques du genre *Ixodes* ont été régulièrement observées** (Martin et al., 2011 ; Medlock et al., 2013 ; Petney et al., 2012 ; Zanet et al., 2020).

Ces organismes sont des vecteurs de nombreuses maladies (babésiose ou piroplasmose, encéphalites à tiques, borréliose de Lyme, etc.). Certaines de ces maladies sont des zoonoses, des maladies transmissibles à l'Homme. Elles ont également de nombreuses incidences sur les populations d'animaux sauvages et domestiques. Des cas de babésiose surviennent de manière saisonnière en estive sur les troupeaux de bovins, c'est également une maladie transmissible à la faune sauvage, notamment aux ongulés.



En 20 ans, la limite de distribution altitudinale des tiques est passée de 700-800 m d'altitude à 1 200 - 1 300 m (Martin et al., 2011). **En Vanoise, des tiques sont également observées sur des bouquetins capturés à plus de 2 000 m d'altitude.**

Plusieurs études attestent également **des déplacements des aires de répartition plus au Nord**, notamment en Suède et en Finlande (Medlock et al., 2013 ; Semenza & Suk, 2018).



Cette expansion des tiques est également favorisée par d'autres facteurs, comme l'augmentation des populations d'hôtes et le déplacements des populations d'hôtes (chevreuils, chamois) ou grâce à leurs déplacements. Des changements dans les pratiques forestières peuvent également favoriser l'expansion de la forêt, milieu favorable à la présence des tiques (Petney et al., 2012).

Quelles
conséquences

2

Influences directes sur les traits de vie

Le changement climatique, via la modification des conditions environnementales, **influence également le cycle de vie des vecteurs, le taux de reproduction des vecteurs et des pathogènes ainsi que la longueur de la période d'activité.** Il peut également réduire la période d'incubation des agents pathogènes, **augmentant ainsi le risque de transmission** (Duvallat, 2015 ; Martin et al., 2011 ; Semenza & Suk, 2018).



Période d'activité allongée pour les tiques

Plusieurs études montrent ainsi qu'une baisse du nombre de nuits en dessous de zéro degré et des températures plus clémentes en hiver favorisent l'activité des tiques et augmentent le risque de maladies liées à ce vecteur (Medlock et al., 2013 ; Petney et al., 2012 ; Zanet et al., 2020). D'ordinaire, l'activité des tiques est moindre en hiver et redémarre quand les températures se réchauffent au printemps.

Des hivers plus doux allongeront la période d'activité des tiques. Au contraire, les chaleurs et les sécheresses stopperont leur activité (Medlock et al., 2013 ; Petney et al., 2012).

3 Influences sur les capacités physiologiques des hôtes

Le changement climatique peut également modifier les réponses des hôtes à leurs pathogènes, notamment en altérant leurs réponses immunitaires. Ces effets peuvent être directs ou indirects (Gallana et al., 2013 ; Jolles et al., 2015).

Effets directs : Les variables climatiques, comme la température, influencent de nombreux processus physiologiques, notamment l'immunité. De nombreux auteurs estiment que des températures trop élevées affaiblissent les défenses immunitaires, notamment car une grande partie de l'énergie est utilisée pour la thermorégulation. Néanmoins, l'effet de la température sur les réponses immunitaires est peu documenté et les réponses divergent selon les organismes étudiés (Martin et al., 2010).

Effets indirects : Via son influence sur la disponibilité et la qualité des ressources (cf. Fiche Bouquetin des Alpes), le changement climatique peut aussi affecter la condition physique des hôtes et leurs réponses immunitaires. Des individus dont la condition physique est altérée seront plus sensibles aux maladies et porteront des charges parasitaires plus importantes (Jolles et al., 2015).



Examen d'un jeune chamois trouvé mort

4 Influences sur les interactions entre les organismes

À travers son influence sur la répartition géographique des populations d'hôtes, de vecteurs et de parasites, le changement climatique entraîne de **nouvelles compositions d'espèces et de nouvelles interactions** (Martin et al., 2011). Possiblement, suite à la contraction des aires de répartition, les animaux se regrouperont sur des zones plus restreintes, ce qui **augmentera les contacts et les risques de transmissions d'une espèce à l'autre ou entre les individus** (Gallana et al., 2013).

Les populations d'animaux sauvages et domestiques **partagent un certain nombre de maladies**. Elles peuvent donc **agir réciproquement comme des réservoirs** en maintenant la présence d'un pathogène dans les écosystèmes. La faune sauvage en particulier est considérée comme un facteur de risque important pour l'émergence d'une maladie car elle est plus difficile à surveiller.

À partir de ces réservoirs, des transmissions peuvent avoir lieu, de la faune sauvage vers des animaux domestiques mais également dans le sens inverse (Cardoen et al., 2014 ; Martin et al., 2011 ; Siembieda et al., 2011).



En parallèle, d'autres facteurs influencent également l'émergence de maladies vectorielles. L'augmentation des populations d'animaux domestiques, la destruction et la fragmentation des habitats, impliquent également plus d'interactions entre la faune sauvage et domestique, ce qui facilite les contacts entre les individus et la transmission des pathogènes (Hofmeister et al., 2010 ; Martin et al., 2011 ; Siembieda et al., 2011).

L'augmentation des populations de vecteurs, notamment les insectes piqueurs, ont d'autres conséquences. Afin d'améliorer le confort de travail des éleveurs, de limiter la transmission de pathogènes et d'augmenter le bien-être des animaux en limitant les dérangements, certains insecticides sont largement utilisés. C'est le cas notamment de la deltaméthrine, une molécule qui impacte grandement certains organismes comme les coléoptères coprophages, groupe taxonomique important pour le recyclage de la matière.



Un parasite peut en combattre un autre



Face au changement climatique, de nombreuses espèces animales et végétales connaîtront des taux d'extinction importants. En tant qu'organismes symbiotiques, les parasites, dépendants de leurs hôtes pour assurer leur cycle de vie, certaines espèces sont également susceptibles de disparaître. Certaines études ont d'ailleurs démontré qu'une grande diversité de parasites peut agir comme un tampon face à l'émergence d'un pathogène virulent. Si ces parasites sont confrontés à des risques d'extinction élevés, plusieurs effets en cascade sont à redouter car ils agissent souvent comme des immunorégulateurs (Carlson et al., 2017).



Liste (non exhaustive) des maladies émergentes potentiellement influencées par le changement climatique (d'après Mills et al., 2010 ; Martin et al., 2011 ; Semenza et al., 2018 ; Siembieda et al., 2011)

Maladies	Vecteurs	Principaux groupes taxonomiques impactés	Cas recensés en Vanoise et/ou Alpes
Borréliose de Lyme	Tiques (notamment <i>Ixodes</i> .)	Petits rongeurs, ongulés sauvages, animaux domestiques (canidés, félins, bovins, ongulés), etc.	X
Piroplasmose (Babésiose)	Tiques	Bovins, ongulés domestiques et sauvages, rongeurs, canidés, etc.	X
Encéphalite à tiques	Tiques	Rongeurs, ongulés domestiques, canidés chevaux, humains	X
Ehrlichiose	Tiques	Animaux domestiques (bovins, chevaux, canidés), cervidés (réservoir), humains	X
Leishmaniose	Phlebotomus	Principalement canidés	En expansion chez les canidés (Alpes du Sud)
Fièvre à virus West Nile	Moustique du genre <i>Culex</i> .	Oiseaux (hôtes principaux) , chevaux, ânes, etc.	Potentiellement
Fièvre catarrhale ovine	Diptères du genre <i>Culicoides</i> .	Principalement ongulés domestiques et sauvages, bovins, etc.	X
Fièvre de la Vallée du Rift	Moustique du genre <i>Aedes</i> . et <i>Culex</i> .	Animaux d'élevage	?
Besnoitiose	Tabanidés et mouches d'étable	Bovins	X



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Carlson, C. J., Burgio, K. R., Dougherty, E. R., Phillips, A. J., Bueno, V. M., Clements, C. F., et al. (2017). Parasite biodiversity faces extinction and redistribution in a changing climate. *Science advances*, 3(9), e1602422.
- Duvallet, G. (2015). Changement climatique et écologie vectorielle. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*, 2, 116.
- Falconi, C., López-Olvera, J.R. & Gortázar, C. (2011). BTV infection in wild ruminants, with emphasis on red deer : A review. *Veterinary Microbiology*, 151, 209–219.
- Gallana, M., Ryser-Degiorgis, M.-P., Wahli, T. & Segner, H. (2013). Climate change and infectious diseases of wildlife : Altered interactions between pathogens, vectors and hosts. *Curr Zool*, 59, 427–437.
- Hofmeister, E., Moede Rogall, G., Wesenberg, K. Abbott, R., Work, T., Shulet, K. et al. (2010). Climate Change and Wildlife Health : Direct and Indirect Effects. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2010–3017, 4 p.
- Jolles, A.E., Beechler, B.R. & Dolan, B.P. (2015). Beyond mice and men : environmental change, immunity and infections in wild ungulates. *Parasite Immunology*, 37, 255–266.
- MacLachlan, N.J. & Mayo, C.E. (2013). Potential strategies for control of bluetongue, a globally emerging, Culicoides-transmitted viral disease of ruminant livestock and wildlife. *Antiviral Research*, 99, 79–90.
- Martin, C., Pastoret, P.-P., Brochier, B., Humblet, M.-F. & Saegerman, C. (2011). A survey of the transmission of infectious diseases/infections between wild and domestic ungulates in Europe. *Veterinary Research*, 42, 70.
- Martin, L.B., Hopkins, W.A., Mydlarz, L.D. & Rohr, J.R. (2010). The effects of anthropogenic global changes on immune functions and disease resistance. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1195, 129–148.
- Medlock, J.M., Hansford, K.M., Bormane, A., Derdakova, M., Estrada-Peña, A., George, J.-C., et al. (2013). Driving forces for changes in geographical distribution of Ixodes ricinus ticks in Europe. *Parasites Vectors*, 6, 1.
- Mercier, A., Grandcollot-Chabot, M., Falala, S., Hendrikx, P., Zientara, S., Breard, E., et al. (2018). Évolution de la situation épidémiologique de la fièvre catarrhale ovine en Europe de 2014 à 2017.
- Petney, T. N., Skuballa, J., Muders, S., Pfäffle, M., Zetlmeisl, C., & Oehme, R. (2012). The changing distribution patterns of ticks (Ixodida) in Europe in relation to emerging tick-borne diseases. In *Arthropods as Vectors of Emerging Diseases* (pp. 151-166). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Semenza, J.C. & Suk, J.E. (2018). Vector-borne diseases and climate change: a European perspective. *FEMS Microbiol Lett*, 365.
- Siembieda, J. L., Kock, R. A., McCracken, T. A., & Newman, S. H. (2011). The role of wildlife in transboundary animal diseases. *Animal Health Research Reviews*, 12(1), 95.
- Zanet, S., Ferroglio, E., Battisti, E. & Tizzani, P. (2020). Ecological niche modeling of Babesia sp infection in wildlife experimentally evaluated in questing Ixodes ricinus. *Geospatial Health*, 15.